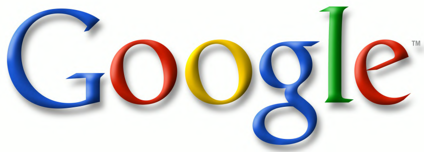




SCIENCE ET AGRICULTURE

PREMIÈRE SÉRIE

LES ENGRAIS

LES FERMENTS DE LA TERRE

SCEAUX. — IMP. CHARAIRE ET Cie.

SCIENCE ET AGRICULTURE

PREMIÈRE SÉRIE

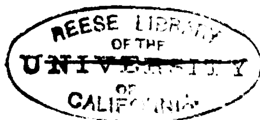
LES ENGRAIS

LES FERMENTS DE LA TERRE

PAR

M. P. P. DEHÉRAIN

Membre de l'Institut.



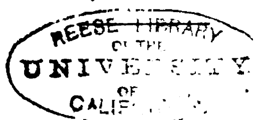
PARIS

RUEFF ET Cie, ÉDITEURS

106, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 106

1895

AVERTISSEMENT



L'introduction dans les assolements des plantes sarclées, l'extension des prairies artificielles marquent les progrès les plus saillants de l'agriculture européenne au XVIIIe siècle ; ils sont purement empiriques.

Ceux que nous avons réalisés dans le siècle qui finit ont, au contraire, une origine scientifique ; ils reposent sur la connaissance de l'alimentation de la plante établie par les travaux de Th. de Saussure, Boussingault et Liebig. L'immense mouvement d'affaires que provoque aujourd'hui l'emploi des engrais découle de leurs découvertes. Quand ils eurent reconnu que les phosphates sont nécessaires à la vie végétale, que la poudre d'os, le noir animal augmentent considérablement

les récoltes des terres dans lesquelles l'acide phosphorique fait défaut, on fut conduit à chercher s'il n'existait pas d'autres sources de phosphates que les os, seuls d'abord employés comme engrais. En 1856, Elie de Beaumont publie son remarquable mémoire sur les gisements géologiques du phosphore, et constate avec effroi qu'ils sont peu nombreux, manifestement insuffisants pour rétablir la fertilité des terres épuisées par la culture. — Les craintes qu'il témoigne pour l'avenir de l'agriculture européenne devaient bientôt s'évanouir; excitées par cette publication, les recherches deviennent actives et coup sur coup on découvre des gisements nombreux et abondants. On trouve des nodules de phosphate de chaux dans plusieurs de nos départements, en Angleterre, en Russie; des phosphorites : en France, au Canada, en Norwège: des apatites : en Espagne; des sables phosphatés dans la Somme et le Pas-de-Calais; plus récemment un énorme gisement en Floride; puis tout à fait dans ces dernières années, une couche de phosphates facilement exploitable s'étalant sur une immense étendue au travers de l'Algérie et de la Tunisie. La fabrication des superphosphates, puisant dans ces prodigieuses réserves, s'accroît chaque an née.

En 1856, Boussingault et M. Georges Ville

reconnurent, en même temps, l'efficacité des nitrates; leur emploi, d'abord restreint, se généralisa bientôt; actuellement, l'Europe utilise un million de tonnes de nitrate de soude provenant de la côte américaine du Pacifique. Ces ressources nouvelles, ces engrais efficaces : nitrates et phosphates, élèvent les rendements, et quand la saison est favorable, comme elle l'a été en 1894, la France récolte une quantité de blé suffisante pour n'avoir plus recours aux importations étrangères.

Il m'a paru qu'il y avait intérêt à indiquer le point auquel est arrivée aujourd'hui cette grande question des engrais, et de traiter ce sujet dans un langage assez simple pour être accessible aux personnes, de plus en plus nombreuses, qui s'intéressent aux choses agricoles.

On trouvera, dans la première partie de ce volume, un chapitre consacré aux engrais organiques : j'insiste particulièrement sur la fabrication du fumier de ferme, qui reste la matière fertilisante par excellence; le second chapitre de cette première partie est réservé aux engrais minéraux et aux amendements.

Dans ces dernières années a été éclairée une autre question débattue depuis près de cinquante ans : l'intervention de l'azote atmosphérique dans les phénomènes de la végétation. On se rappelle

la longue discussion dans laquelle s'engagèrent : Boussingault affirmant que l'azote atmosphérique n'est pas utilisé par les plantes, et M. Georges Ville soutenant l'opinion contraire. Cette discussion n'a pris fin que récemment, quand l'illustre chimiste Berthelot reconnut que la terre renferme des êtres vivants, des ferments capables de fixer l'azote atmosphérique, de l'utiliser à la formation de matières organiques, quand MM. Hellriegel et Wilfarth, en Allemagne, découvrirent que les légumineuses doivent leurs propriétés améliorantes à l'apparition sur leurs racines de nodosités peuplées de bactéries fixatrices d'azote atmosphérique.

L'azote combiné est nécessaire à la vie végétale ; nous savons aujourd'hui que c'est par l'intermédiaire des ferments que la terre puise dans l'immense réserve de l'atmosphère : l'exposé des découvertes qui nous ont conduit à ces idées nouvelles, sur la fixation de l'azote atmosphérique dans le sol, forme le premier chapitre de la partie de ce volume réservée aux ferments de la terre.

Le second chapitre est intitulé : l'utilisation de l'azote du sol ; c'est encore sous l'influence de microorganismes que l'azote, qui reste inerte dans l'humus, est mobilisé et devient assimilable.

Les recherches de MM. Schlœsing et Muntz, celles

plus récentes de M. Winogradsky nous ont fait connaître les ferments spécifiques qui entrent en jeu dans nos terres cultivées pour transformer successivement en ammoniaque, en nitrites, enfin en nitrates, la matière organique du sol.

L'étude attentive de la formation des nitrates dans la terre a fait voir que, généralement insuffisante au printemps, la nitrification s'exalte en été et atteint son maximum en automne à une époque où, loin d'être utile, elle détermine des pertes considérables : les nitrates formés dans les terres dépouillées de leurs récoltes sont entraînés par les eaux qui traversent le sol, on les trouve dans les eaux de drainage. Les cultures dérobées d'automne, sur lesquelles nous insistons à diverses reprises, ont précisément pour but d'empêcher ou au moins de restreindre ces pertes.

Dans les sols humides, bien aérés, la nitrification acquiert une extrême énergie, la fertilité s'accroît avec l'abondance des nitrates formés, et c'est pour créer un milieu de culture favorable aux ferments nitriques que, depuis l'antiquité la plus reculée, le laboureur travaille son champ et pulvérise sa terre.

L'agronomie, comme la médecine, subit l'influence des découvertes de notre grand Pasteur : nous savons aujourd'hui que la fertilité dérive de la

connaissance de plus en plus complète, de la mise en jeu de plus en plus habile des ferments de la terre.

Nous avons donc essayé de résumer, dans ce petit volume, les deux progrès les plus saillants accomplis depuis cinquante ans : après avoir décrit les engrais dont l'emploi s'accroît chaque jour, nous montrons comment les ferments de la terre, les infiniment petits, longtemps ignorés, exercent sur la production agricole une influence dont les travaux récents permettent à peine de mesurer l'étendue.

Les lecteurs de la *Revue des Deux-Mondes* retrouveront dans ce volume les articles publiés en 1893 et en 1894, étendus et modifiés, car, dans une science en voie de formation, chaque jour apporte une notion nouvelle.

P.-P. D.

LES ENGRAIS

ET LES

FERMENTS DE LA TERRE

PREMIÈRE PARTIE

LES ENGRAIS

CHAPITRE PREMIER

LES ENGRAIS ORGANIQUES

En 1825, l'enseignement agricole ne figurait au budget que pour 276 241 francs : aujourd'hui plus de quatre millions lui sont accordés; non seulement le gouvernement de la République a rétabli l'Institut agronomique, créé en 1848, puis détruit en 1852, mais il a multiplié les écoles pratiques d'agriculture, il a décidé que dans chaque département un professeur au moins, souvent plusieurs, iraient de commune en commune exposer dans des conférences publiques les saines

méthodes de travail; on a créé des champs d'essais, de démonstration; l'effort a été vigoureux, continu, et cependant jamais le malaise de l'agriculture n'a été plus grand, les plaintes plus vives et plus acerbes; les cultivateurs ont assiégé le Parlement de leurs doléances, exigé de profondes modifications à notre système douanier. Et en effet leur situation est difficile. Est-ce donc que les dépenses affectées à l'enseignement agricole ont été stériles, que la science est impuissante, ses conseils vains, ses enseignements inutiles?

Avant de renoncer aux espérances qu'ont fait concevoir les travaux des agronomes, il convient de chercher quelles sont les causes de la crise actuelle. La principale est sans contredit la baisse de prix des denrées agricoles; la crise est d'ordre économique.

On désigne sous le nom de « produit brut » la somme réalisée par la vente des denrées récoltées; et en rapportant le produit à une mesure commune, l'hectare par exemple, on possède une unité qui permet la comparaison des domaines les uns aux autres. Le produit brut s'obtient en multipliant le poids des marchandises récoltées par les prix auxquels ces marchandises sont livrées. Un vigneron de l'Hérault qui obtient 100 hectolitres de vin commun à 15 francs l'hectolitre fait 1 500 francs de produit brut, un propriétaire du Médoc ne récolte que 30 hectolitres de vin, mais il vend 50 francs l'hectolitre, il a encore 1 500 francs de produit brut. Le gain, le bénéfice, ou encore le produit net, — ces expressions s'équivalent, — s'obtient en défal-

quant du produit brut les dépenses de toutes sortes auxquelles donne lieu ce produit. Un cultivateur de betteraves obtient 30 000 kilos de racines à l'hectare; il les vend 25 francs les 1 000 kilos à la sucrerie voisine ; son produit brut est de 750 francs. Si l'ensemble des dépenses qui incombent à l'hectare, — c'est-à-dire le prix du loyer à payer au propriétaire, les factures des marchands d'engrais et de semences, les journées des ouvriers qui ont biné à plusieurs reprises les racines, qui les ont arrachées, conduites à la sucrerie, — ne représente que 600 francs. ce cultivateur aura un bénéfice de 150 francs, différence entre 750 francs : produit brut, et 600 francs : dépenses; mais si les dépenses, au lieu d'être de 600 francs, se sont montées à 800 francs, elles dépassent le produit brut : l'opération se solde en perte. Un fermier éloigné d'un grand centre de consommation et qui ne peut vendre sa paille, n'a comme produit brut d'une culture de blé que la vente du grain ; il a obtenu à l'hectare 20 quintaux : en multipliant par le prix de vente du quintal, il trouvera le produit réalisé par sa culture ; or ce prix de vente du quintal de blé, naguère à 30 francs, est tombé à 25, puis à 21 francs ; enfin, pendant la dernière année, après de nombreuses oscillations, il reste à 19 francs : c'est à peu près le prix actuel. Aujourd'hui cette récolte de 20 quintaux, bien supérieure à la moyenne de la France, ne représente donc que 380 francs : or les dépenses de culture d'un hectare dépassent parfois ces 380 francs, de telle sorte que loin d'obtenir de son travail une juste rémunéra-

tion, le cultivateur est obligé de prélever sur son capital, et il se ruinerait en continuant d'exploiter dans de pareilles conditions.

La crise actuelle est due au bas prix des denrées agricoles ; pour les relever, on a eu recours aux remaniements des tarifs douaniers; en frappant d'abord d'un droit de 5 francs chaque quintal de blé étranger qui pénètre en France, on a souvent réussi à maintenir nos prix, de 5 francs supérieurs à ceux qui sont pratiqués en Angleterre, restée fidèle au libre-échange. Le système protectionniste, qui amène fatalement un malaise général en réduisant le chiffre des affaires, réussira-t-il à produire une hausse artificielle suffisante pour combattre l'avilissement des prix? Cela paraît bien douteux, puisque la protection de 5 francs par quintal a été jugée insuffisante, et qu'après une longue discussion, le Parlement, pressé par ses électeurs ruraux, a élevé le droit de douane à 7 francs les 100 kilos.

Quoi qu'il en soit, la science n'est pas responsable de ce bas prix des denrées agricoles ; elle offre même le seul remède qui puisse efficacement le combattre. Nous avons vu que le produit brut était obtenu par la multiplication de deux nombres : quantité de marchandise produite, prix de cette marchandise; or si la science est incapable d'agir sur les prix du blé, elle enseigne à augmenter sa récolte, c'est là son rôle, et, si elle le remplit bien, la crise peut être conjurée. Supposons qu'un cultivateur de blé ne puisse avoir de bénéfice

qu'autant que la vente de la récolte d'un hectare lui rapporte 600 francs : visiblement ces 600 francs peuvent être obtenus soit avec une faible récolte vendue cher, soit avec une bonne récolte vendue bon marché ; on fait 600 francs de produit brut avec 20 quintaux de blé à 30 francs ou 30 quintaux vendus 20 francs.

Si les cultivateurs, plus habiles qu'ils ne sont encore, élevaient les rendements jusqu'à faire des bénéfices en vendant à bas prix, il en résulterait des bienfaits inestimables, puisque l'accroissement des aliments diminue le nombre des créatures humaines qui souffrent de la faim ou pâtissent par manque d'une nourriture suffisante. Les progrès réalisés sont déjà immenses : les châtaignes, les galettes de sarrasin, le pain noir, ont fait place sur presque toute notre France au pain de froment ; la viande, naguère inconnue au village, y est devenue commune ; on boit du vin ou du cidre là où l'on se contentait d'eau claire. Les progrès réalisés par la culture ont donc été considérables : peuvent-ils s'accentuer de nouveau ? est-il possible d'atteindre des rendements assez élevés pour que l'agriculture soit prospère en vendant toutes les denrées nécessaires à la vie à des prix tels que ces denrées deviennent accessibles à ceux qui en sont encore privés ? Telle est la question que je veux aborder dans ces études.

§ I

Matières nécessaires au développement des végétaux.

Pour qu'une terre atteigne le maximum du produit, il faut que chacune des plantes qui la couvre trouve, à chaque instant de son développement, toutes les matières alimentaires qui lui sont nécessaires : or s'il existe des sols privilégiés assez bien garnis de ces aliments nécessaires aux végétaux pour fournir d'abondantes récoltes sans aucune addition, dans la grande majorité des cas, une contrée, cultivée sans addition d'aucune sorte, perd peu à peu sa fertilité, les rendements diminuent, elle devient incapable de nourrir la population qui l'occupait; cette population fuit cette terre devenue ingrate, elle émigre. Aussi, depuis un temps immémorial, les populations sédentaires ont-elles essayé de maintenir la fertilité des terres qu'elles occupaient au moyen des engrais. On a reconnu, dès l'antiquité la plus reculée, que les litières salies par les déjections des animaux étaient un engrais efficace; toutefois ces premières connaissances étaient purement empiriques : l'usage rationnel des engrais est tout récent, il dérive des connaissances que, depuis un siècle, nous avons lentement acquises du mode d'alimentation des végétaux.

Cherchons donc comment vit la plante que nous cultivons. Quand nous connaîtrons ses exigences, nous

pourrons peut-être les satisfaire, et voir notre plante devenue vigoureuse nous fournir ces rendements élevés, objets de nos désirs.

Le végétal se nourrit par ses feuilles et par ses racines, et pour bien saisir leurs fonctions, cultivons un sable lavé, puis calciné, incapable par lui-même de céder à la plante aucun aliment : il servira seulement de support. Si dans ce sable, régulièrement arrosé, on sème quelques graines de colza ou quelques grains de blé, on voit bientôt apparaître de petites tiges délicates, et pendant les premiers jours les jeunes plantes présentent les apparences de la santé; les tiges sont droites, les feuilles bien vertes. Ainsi, la première étape de la vie végétale, pendant laquelle l'embryon sort de la graine et forme racines et tige, est parcourue sans autre condition que de l'air et de l'eau. Celle-ci, dans notre expérience, a été donnée avec profusion : si elle fait défaut, la germination s'arrête, et tout de suite, dès nos premiers essais, nous reconnaîtrons la grande difficulté de la culture, ce qui en fait si souvent un métier décevant : sa dépendance absolue des conditions météorologiques. Si au moment des semailles la pluie n'arrive pas, si, comme cela a eu lieu en 1893, une longue sécheresse persiste en mars et en avril, les semis avortent, ou les plantes n'apparaissent que tardivement.

Quand l'humidité est suffisante, comme nous avons eu soin qu'elle le fût dans notre expérience, la germination a lieu : les réserves de la graine suffisent à la

formation des jeunes organes; mais très vite nous voyons le colza semé dans notre sable calciné jaunir, et si on se borne aux arrosements à l'eau distillée, il périt; le blé résiste un peu plus longtemps, car la graine dont il provient est plus grosse, plus chargée d'amidon et de la matière azotée qui servent l'un et l'autre à la formation des organes nouveaux. La graine est une mère et une nourrice; dans le colza la nourrice, très faible, est bien vite épuisée; elle ne l'est qu'un peu plus tard dans le blé; peu à peu, cependant, la graine se vide, l'épiderme seul subsiste, et à son tour la jeune plante périt.

Ainsi l'air et l'eau, suffisants pour déterminer la germination, sont incapables de soutenir la vie végétale; l'expérience nous a enseigné quelles sont les matières qu'elle exige; nous savons préparer dans les laboratoires de physiologie des dissolutions que nous désignons sous le nom de « mélanges nutritifs »; arrosons nos semis, avant qu'ils aient donné les moindres signes d'affaiblissement, avec un de ces mélanges dans lequel nous aurons soin de ne pas introduire de combinaisons du carbone : les semis deviennent vigoureux, les feuilles se développent les unes après les autres. Prolongeons l'expérience pendant deux mois, puis renversons nos vases, lavons avec soin les racines pour les dégager du sable, et pesons nos récoltes : leur poids est bien supérieur à celui des graines primitives; mais les graines sont presque sèches, les plantes gorgées d'eau : il convient donc de dessécher complètement nos

semis et des graines semblables à celles que nous avons semées pour savoir si réellement dans ce sable stérile de la matière végétale a été élaborée. Après dessiccation nous pesons de nouveau : décidément les plantes sèches sont plus lourdes que les graines ; le mélange nutritif employé a été efficace, les plantes se sont accrues.

Pour pénétrer plus avant, procédons à l'analyse élémentaire; déterminons les corps simples qui constituent les plantes récoltées : en comparant cette composition à celle de la graine, nous allons savoir quels sont ceux que la jeune plante s'est assimilés pendant sa courte existence. Or l'analyse nous enseigne que le poids de carbone contenu dans le colza ou le blé surpasse de beaucoup celui qui existait dans la graine, et comme, ainsi qu'il a été dit, ni la dissolution nutritive ni le sable calciné ne renfermaient de carbone, il faut qu'il ait été pris dans l'air. Il s'y trouve, en effet, parcimonieusement répandu sous forme d'acide carbonique, c'est-à-dire d'une combinaison de carbone et d'oxygène. Notre atmosphère ne renferme que 3 dix millièmes d'acide carbonique, et il semble au premier abord que les feuilles auront quelque peine à se saisir de ces rares molécules d'acide carbonique noyées dans un océan d'oxygène et d'azote : il est facile cependant de montrer par l'expérience combien la végétation absorbe rapidement cet acide carbonique aérien.

Quand on délaie de la chaux dans l'eau, on en dissout de petites proportions ; si on sépare, par un filtre, le liquide de la chaux non dissoute, on obtient une

liqueur limpide désignée dans les laboratoires sous le nom d'eau de chaux : c'est là un réactif précieux pour caractériser l'acide carbonique. Si, en effet, on fait barboter de l'air commun dans l'eau de chaux, elle ne tarde pas à se troubler ; l'acide carbonique produit, en s'unissant à la chaux, un composé insoluble dans l'eau : le carbonate de chaux, qui, sous forme de craie, de calcaire grossier, de marbre, est très commun à la surface du globe. Imaginons maintenant qu'on ait tapissé un long tube de verre de feuilles longues et étroites comme celle d'une graminée, puis qu'on appelle, à l'aide d'un écoulement d'eau, un courant d'air, qui devra parcourir le tube avant d'atteindre un flacon d'eau de chaux interposé entre l'extrémité du tube et l'aspirateur, et l'on verra que l'air qui a passé sur les feuilles ne trouble plus l'eau de chaux ; il a été dépouillé de son acide carbonique ; et il faut beaucoup accélérer la rapidité du courant d'air pour reconnaître, par un léger trouble qui survient dans l'eau de chaux, que quelques molécules d'acide carbonique ont échappé aux feuilles. Elles doivent cette puissance d'absorption à l'eau qui les gorge ; l'acide carbonique est très soluble, et quand on détermine rigoureusement par l'expérience la quantité d'acide carbonique qu'absorbent des feuilles appartenant à diverses espèces végétales maintenues à des températures variables, on trouve que ces quantités sont presque identiques à celles qu'auraient dissoutes, à ces mêmes températures, des quantités d'eau égales à celles que contiennent les feuilles en expérience.

La structure de la feuille est admirablement adaptée à cette fonction spéciale : saisir l'acide carbonique aérien. Elle est plate, d'énorme surface par rapport à son poids ; attachée à un rameau flexible, elle est mobile ; baignée à chaque instant par de nouvelles couches d'air, elle les dépouille de leur acide carbonique. Quand les radiations solaires, la lumière, frappent les feuilles ainsi chargées d'acide carbonique dissous, elles y déterminent la décomposition de cet acide carbonique et sa transformation en matière organique combustible. C'est dans les derniers éléments des feuilles, dans les cellules où le microscope permet de distinguer les grains de la matière verte qui donne aux végétaux leur couleur, que se produit le phénomène grandiose qui assure la perpétuité de la vie animale à la surface de la terre.

L'animal est un appareil à combustion, qui ne produit chaleur et travail qu'à la condition de consommer, de brûler de la matière organique ; il en forme de l'acide carbonique et de l'eau qu'il élimine par ses organes respiratoires : la plante au contraire est un appareil de réduction qui s'empare de cet acide carbonique, de cette eau, pour élaborer la matière combustible en rejetant l'oxygène.

La matière ainsi formée dans la feuille, ce résidu de la décomposition de l'acide carbonique hydraté, subit une série de métamorphoses pendant lesquelles il se complique et finit par apparaître sous forme de sucres, de gommes, d'amidon, de celluloses. Quelques-unes de ces transformations ont été réalisées dans

le laboratoire par les seules forces chimiques, et nous pouvons suivre étapes par étapes, les synthèses successives qui amènent à l'état de sucre : l'aldéhyde méthylique, que laisse dans la feuille la décomposition de l'acide carbonique hydraté; nous pouvons même constater, sur la feuille elle-même, que ces métamorphoses produites à l'origine par l'intervention des radiations solaires, conduisent à la production d'un corps encore plus complexe que le sucre : l'amidon.

L'expérience est facile à reproduire : de bon matin on choisit sur une plante, sur une aristoloche par exemple, une feuille qui n'a pas reçu encore les rayons solaires, mais qui est bien placée pour les recevoir un peu plus tard, et, à l'aide de gomme arabique, on fixe sur la face inférieure un papier noir; dans le papier destiné à recouvrir la face supérieure on a découpé des lettres de telle sorte que, au moment où l'expérience commence, on n'aperçoit la couleur verte de la feuille qu'au travers des découpures du papier; les parties ainsi découvertes seules seront bientôt éclairées. On laisse agir le soleil pendant quelques heures, puis on détache la feuille ainsi partiellement insolée, on la décolore à l'aide d'alcool ou de chloral, puis on la maintient pendant quelques instants dans la teinture d'iode; on enlève ensuite l'excès de la teinture par l'alcool. Si on place enfin la feuille ainsi traitée dans l'eau, on voit apparaître nettement les caractères en bleu foncé. On sait que l'iode colore en bleu l'amidon : visiblement la feuille n'en a formé qu'aux places où

les radiations solaires ont atteint les cellules à chlorophylle ; partout, au contraire, où la feuille a été protégée par le papier noirci, elle reste blanche, décolorée; l'iode y est sans action. Si on avait opéré sur une feuille déjà éclairée, l'amidon aurait été abondant dans toutes les cellules, et les lettres n'auraient pas présenté le relief qu'elles acquièrent quand on agit sur une feuille non encore insolée, qui pendant la nuit s'est dépouillée peu à peu de l'amidon formé pendant la journée précédente.

La feuille nous apparaît donc comme le laboratoire dans lequel prend naissance la matière carbonée, et cette matière carbonée a pour origine l'acide carbonique aérien. Mais tout de suite un doute apparaît dans notre esprit : Pourquoi la culture établie dans le sable calciné a-t-elle si mal réussi quand nous avons simplement arrosé avec de l'eau distillée? Nous n'avons pris aucune précaution pour écarter l'acide carbonique aérien : Pourquoi n'a-t-il pas suffi à l'alimentation de la plante? Pourquoi au contraire l'expérience a-t-elle continué et les plantes sont-elles devenues prospères quand dans les arrosages nous avons substitué à l'eau distillée les dissolutions nutritives? Que renferment ces dissolutions nutritives? Comment rendent-elles fertile du sable calciné?

Nous allons l'apprendre. Nous savons, par l'analyse que nous avons faite de graines semblables à celles qui ont été employées à nos semis, qu'outre le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, ces graines renferment de

l'azote : ajoutons donc à notre eau distillée une matière soluble azotée, de l'azotate d'ammoniaque par exemple, qui est formé d'azote, d'oxygène et d'hydrogène, et déjà notre semis est infiniment plus vigoureux que celui qui n'a reçu que de l'eau distillée. Bientôt cependant il manifeste des signes d'affaiblissement, il est bien loin d'égaler les végétaux semés en même temps dans une bonne terre. Quelque chose manque encore.

Or, quand nous avons brûlé nos graines, nous avons vu qu'elles ne sont pas formées seulement de matières combustibles qui disparaissent pendant la calcination ; elles ont toujours laissé dans notre capsule, après que toute la matière organique a disparu, des cendres : de quoi sont-elles composées? Nous y trouvons tout d'abord de l'acide phosphorique et en grande quantité, puis de la potasse, de la magnésie, de la chaux, de la silice, des traces d'oxyde de fer.

Pour savoir si ces substances sont accidentelles ou nécessaires, nous allons employer encore la méthode qui nous a déjà réussi. Introduisons dans nos liquides nutritifs : de l'acide phosphorique; ajoutons à notre azotate d'ammoniaque, du phosphate d'ammoniaque, et nous obtenons une récolte qui surpasse de beaucoup la précédente, sans atteindre cependant celle qui croît en pleine terre. Ajoutons encore à notre liquide nutritif de la potasse, nouvelle amélioration, et successivement joignons à ces matières tous les éléments des cendres, et peu à peu nous voyons nos rendements s'améliorer jusqu'à égaler et même surpasser ceux que fournit une

terre fertile, mais qui n'aurait pas reçu autant d'aliments végétaux qu'en ont apporté au sable les dissolutions nutritives employées.

A l'aide de cette méthode nous sommes donc parvenu à connaître le mode d'alimentation des plantes ; elles ne vivent qu'autant qu'elles trouvent à portée de leurs racines des matières azotées, de l'acide phosphorique, de la potasse, de la magnésie et de la chaux ; si l'un quelconque de ces éléments fait défaut, les autres deviennent inutiles, l'activité des feuilles s'éteint, elles cessent de décomposer l'acide carbonique aérien, l'élaboration de la matière végétale s'arrête. Les conclusions auxquelles nous sommes arrivé ont été contrôlées au reste, non plus par des essais de laboratoire portant sur quelques graines, mais bien par les cultures établies dans plusieurs domaines et notamment dans celui de Rothamsted, illustré par les recherches poursuivies pendant cinquante ans par sir J.-B. Lawes et par sir Henry Gilbert. Ces recherches ont démontré que l'alimentation purement saline convenait aux graminées, notamment au blé, en maintenant indéfiniment sa culture sur le même sol, additionné seulement de nitrates ou de sels ammoniacaux et d'un mélange de phosphates, de sels de potasse et de magnésie ; la chaux, la silice et le fer étaient assez abondants dans le sol pour qu'il fût inutile d'en ajouter.

Cette alimentation saline qui convient si bien aux graminées ne suffit plus à d'autres plantes de grande culture, notamment aux légumineuses. Que leur faut-il

donc de plus? De l'humus. On désigne sous ce nom les débris organiques encore mal définis qui proviennent de la transformation par les ferments de la terre des débris des végétations antérieures. J'ai cultivé, il y a quelques années, à l'École de Grignon, dans de grands pots de grès renfermant 50 kilos de terre épuisée par une longue suite de culture sans engrais, le ray-grass des prairies permanentes et le trèfle des prairies artificielles. Les rendements les plus élevés du ray-grass étaient obtenus à l'aide des engrais salins : nitrate, phosphates, sels de potasse; celui du trèfle, très ordinaire sous l'influence de ces engrais, ne remontait que par l'addition au sol des matières organiques extraites par l'eau chaude du fumier de ferme.

Les cultivateurs ont remarqué depuis longtemps que lorsqu'une luzerne a occupé le sol pendant plusieurs années, elle s'affaiblit et les graminées l'envahissent; si on la défriche, il est inutile d'essayer de semer de nouveau de la luzerne : elle germe, puis languit et disparaît. Il faut attendre plusieurs années, quinze ou vingt ans, pour que la luzerne puisse être de nouveau semée avec quelque chance de durée. Quelquefois même, si sa culture a été maintenue longtemps, le sol reste incapable pendant de longues années de lui donner la vigueur qu'elle avait autrefois. Au sud de Paris, autour de Juvisy, s'étend une plaine excellente; pendant trente ans, les fermiers s'y sont enrichis en y cultivant la luzerne. A cette époque, elle durait sept ou huit ans, fournissant de brillantes récoltes; aujourd'hui,

après deux ans, trois ans au plus, elle est envahie par les graminées : il faut la retourner.

Je me rappelle toujours que, visitant avec sir Henry Gilbert le domaine de Rothamsted, il m'arrêta devant une terre nue, tout à fait privée de végétation, et il me dit en souriant : « Voici le champ de culture continue du trèfle. Nous avons eu à l'origine des récoltes passables ; maintenant le trèfle ne peut plus venir sur cette pièce. » Mon savant ami me montra cependant une culture continue de trèfle qui avait réussi ; elle occupait une petite plate-bande du jardin voisin de la maison de sir J.-B. Lawes ; on y avait prodigué autrefois, comme le font les jardiniers, le fumier de ferme ; l'humus y était abondant, et depuis plus de vingt ans le trèfle y prospérait.

Nous voici renseignés, la plante ne vit que si elle trouve dans l'air de l'acide carbonique ; dans le sol, à portée de ses racines, de l'eau et diverses matières que nous venons d'énumérer, et parmi lesquelles se placent au premier rang les composés azotés, l'humus, l'acide phosphorique, la potasse, la chaux : ce sont ces matières qui constituent les engrais. En les employant, nous augmentons la fertilité du sol, qui habituellement ne renferme pas ces divers principes en quantités suffisantes pour assurer l'alimentation de tous les individus de même espèce, que nous cultivons les uns à côté des autres. Sans doute, les terres que nous ensemençons ne sont pas tout à fait dépourvues des aliments végétaux, et si nous avions en France d'immenses étendues

de terres à très bon marché, nous pourrions, comme on le fait dans l'Ouest américain, cultiver sans engrais; nous produirions de huit à dix hectolitres de blé à l'hectare, rendement suffisant pour des terres de faible valeur, libres d'impôts, mais ruineux pour des sols surchargés de redevances comme les nôtres. — Notre culture ne prospère qu'avec l'aide des engrais; ils se partagent naturellement en deux groupes : les uns proviennent des animaux et des végétaux, ce sont les engrais organiques; les autres, extraits de gisements disséminés à la surface du globe, portent le nom d'engrais minéraux; nous les examinerons successivement.

§ II

Fumier de ferme.

Les litières salies par les déjections des animaux domestiques, le fumier de ferme est employé comme engrais depuis un temps immémorial. Il est précieux parce qu'il renferme toutes les matières nécessaires à l'alimentation végétale; on y trouve, en effet, de l'azote combiné : 5 millièmes environ, dont une partie sous la forme assimilable d'ammoniaque; le reste, engagé en combinaison avec le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, fait partie des matières humiques; on trouve encore, dans le fumier, de l'acide phosphorique, de la chaux et de la potasse; on conçoit donc qu'à lui seul il puisse

maintenir la fertilité et conduire aux récoltes moyennes dont pendant bien des années on s'est contenté.

Si le fumier est employé depuis un temps immémorial, il n'y a que peu d'années que nous savons comment sa fabrication doit être conduite pour qu'il acquière toute sa valeur. Dans les fermes bien tenues, tout le fumier produit est accumulé sur un emplacement spécial désigné, suivant sa disposition, sous les noms de plate-forme ou de fosse. La plate-forme est en terre battue, imperméable; elle présente une légère convexité, de façon que les liquides qui découlent de la masse arrivent à un ruisseau pavé qui entoure la plate-forme. L'inclinaison de ce ruisseau est calculée pour conduire les liquides noirs, le purin, jusqu'à un trou maçonné dans lequel plonge l'extrémité d'une pompe destinée à remonter le purin jusqu'à la surface du tas, qui doit être régulièrement arrosé. La plate-forme, très répandue aux environs de Paris, est remplacée dans le Nord par la fosse. On la construit, en creusant le sol de la cour de façon à former deux plans légèrement inclinés; à leur rencontre, au point le plus bas, est placée la grille qui permet l'écoulement du purin dans le trou maçonné, où il est puisé par une pompe. Dans cette disposition le fumier est étalé sur une grande surface, et il ne serait pas suffisamment tassé si on n'y maintenait constamment les jeunes bœufs d'élevage. Accès facile aux brouettes amenant des étables ou des écuries les litières salies, aux charrettes qui viennent charger le fumier au moment où il doit être conduit

aux champs ; possibilité d'arroser la masse à l'aide du purin entièrement recueilli, telles sont les conditions nécessaires à une bonne installation.

Nous avons, à l'École de Grignon, la prétention justifiée, je crois, de très bien fabriquer le fumier ; nous n'avons rien changé aux dispositions prises, il y a plus de soixante ans, par le fondateur de l'École, Auguste Bella, et nous nous en trouvons bien. La plate-forme est placée au milieu d'une cour limitée par les étables, les écuries et les bergeries ; tous ces bâtiments sont munis de ruisseaux qui communiquent par des caniveaux souterrains avec le trou à purin : les liquides sont donc entièrement recueillis. Quant aux litières, elles sont conduites à la plate-forme et étalées régulièrement ; sur l'un des côtés, on dispose le fumier en plan incliné, garni de planches, pour faciliter le passage des brouettes. Les garçons de cour égalisent à la fourche le fumier qui vient d'être amené, de façon que la surface soit horizontale ; en outre ils tordent sur les parois les litières, de telle sorte que la masse présente sur trois faces une paroi parfaitement verticale ; quand la hauteur du tas atteint 3 mètres, on commence à garnir une seconde plate-forme.

L'exploration du tas de fumier à l'aide d'un thermomètre est fort curieuse. A 1 mètre du sol environ ruisselle un liquide noir ; il se fige par places en stalactites qui recouvrent les pailles d'un mince enduit : à cette hauteur, le thermomètre ne marque guère que 25 ou 30° ; un peu plus haut, à $1^{m},50$ environ, la température

s'élève déjà de 40 à 50°, et à 2 mètres de hauteur, plus près par conséquent de la surface supérieure, le thermomètre monte souvent à 70°. C'est dans le fumier provenant des écuries qu'on observe les températures les plus élevées : les maraîchers emploient exclusivement le fumier de cheval pour garnir les couches sur lesquelles ils cultivent les végétaux de primeurs.

Pour savoir à quelles causes il convient d'attribuer ces différences de température constatées à diverses hauteurs du tas de fumier, il faut déterminer la composition de l'atmosphère qui s'y trouve confinée : on y réussit en forant, à l'aide d'une tige de fer, des trous dans la masse; on substitue ensuite sans difficulté à la tige métallique un tube de verre; on le lie par des tubes de caoutchouc à deux flacons portant des tubulures inférieures reliées l'une à l'autre par de bons tubes de caoutchouc. Imaginons que le flacon, dont la tubulure supérieure est en relation avec le tube enfoncé dans le fumier, soit rempli de mercure, et que le second flacon que nous avons tenu jusqu'à présent plus élevé que le flacon à mercure soit vide : on conçoit sans peine que, si nous abaissons le flacon vide au-dessous du flacon à mercure, ce liquide va s'écouler et déterminer un vide qui sera comblé par le gaz contenu dans le fumier; bientôt tout le mercure sera écoulé, et le flacon rempli du gaz que nous voulons analyser. Nous détacherons le caoutchouc qui reliait le flacon au tube enfoncé dans le fumier, nous adapterons un tube à dégagement; et en élevant le flacon actuellement plein de mercure, nous

chasserons le gaz du fumier dans les tubes où nous pourrons l'analyser.

Les gaz extraits du fumier ne renferment jamais d'oxygène; à la partie supérieure, là où la température atteint 70° environ, on trouve que le quart du volume total est de l'acide carbonique, le reste est de l'azote. Son origine n'est pas douteuse, c'est de l'azote atmosphérique. Dans cette partie de la masse, l'air pénètre; son oxygène brûle les principes les plus attaquables de la paille et se transforme en acide carbonique; l'élévation de température est due à la combustion lente. Le gaz extrait un peu plus bas présente une composition bien différente de celle que nous venons de constater : l'azote y est moins abondant et mêlé à l'acide carbonique, on reconnaît le gaz des marais, l'hydrogène carboné qu'il est facile d'allumer. Le gaz puisé tout à fait en bas du tas de fumier ne renferme plus guère d'azote, peu d'acide carbonique; le gaz des marais domine.

Les réactions qui donnent naissance à l'acide carbonique et au gaz des marais sont dues à l'activité de ferments faciles à examiner au microscope : une goutte de liquide provenant du lavage du fumier est peuplée de bactéries dodues, peu agiles, portant souvent des spores brillantes; on réussit à les cultiver sur de la filasse de lin, sur du papier, par conséquent sur de la cellulose, en plongeant ces matières dans des liquides chargés de carbonate de potasse, de carbonate d'ammoniaque et d'un peu de phosphate d'ammoniaque. Ce mélange ensemencé, avec quelques gouttes de purin et

maintenu à 50° environ, dégage de l'acide carbonique et du gaz des marais en volumes égaux. Les bactéries vivent et travaillent à cette température élevée; elles persistent même jusqu'à 72°, mais à 80° elles périssent; une fermentation en pleine activité, portée jusqu'à ce degré de chaleur, s'éteint, tout dégagement de gaz cesse.

Les bactéries qui entrent en jeu dans le fumier proviennent du tube digestif des animaux: dans la partie supérieure du tas, là où l'air pénètre, elles favorisent l'action de l'oxygène; la gomme et les sucres de la paille sont brûlés; dans les parties plus profondes, les bactéries s'attaquent à la cellulose. La paille des litières est ainsi profondément modifiée. En effet, des trois principes qui la constituent : gomme, cellulose et vasculose, les deux premiers sont partiellement détruits; le dernier, qui résiste, se déshydrate, se dissout dans les liquides alcalins, et donne au purin, au fumier lui-même, sa couleur brun foncé.

Un fumier fermenté est celui qui a subi profondément ces métamorphoses : on les hâte en procédant à des arrosages réguliers à l'aide du purin, qui, pénétrant dans la masse, dissout l'acide carbonique, facilite l'accès de l'air, dont l'oxygène active les combustions et ranime les bactéries ; peu à peu, la paille se réduit, se désagrège, forme une masse molle, facile à couper à la bêche, et prend finalement l'aspect de l'humus.

Les cultivateurs des terres légères trouvent grand avantage à pousser très loin la fermentation du fumier; ceux qui tiennent au contraire des terres fortes, argi-

leuses, attachent moins d'importance à cette fermentation et conduisent le fumier dans leurs champs toutes les fois qu'ils sont abordables : pour bien comprendre quelles raisons dictent leur conduite, il faut suivre les transformations que subissent dans le fumier les matières organiques azotées.

Les animaux reçoivent dans leur ration des matières azotées : le foin renferme de l'albumine semblable à celle de l'œuf; les grains contiennent de la caséine, analogue à celle du lait, du gluten, de même composition que la fibrine des muscles, et on conçoit qu'une partie de ces matières ingérées soit fixée dans l'organisme : une autre est brûlée, amenée à l'état d'urée et rejetée par les urines; une plus faible fraction des matières azotées de la ration passe dans les déjections solides.

Maintenue dans l'air pur à l'abri des germes, l'urée reste inaltérée, mais un ferment, partout répandu, la transforme rapidement en carbonate d'ammoniaque. Cette métamorphose se produit déjà dans les bergeries et, quand elles sont mal ventilées, l'odeur y est insupportable, car le carbonate d'ammoniaque est très volatil. Au moment où elles arrivent à la plate-forme, les matières sont donc imprégnées de carbonate d'ammoniaque. Si elles n'y font qu'un court séjour et que rapidement elles soient conduites aux champs, elles en renferment encore, et si elles sont incorporées à un sol léger, perméable à l'air, très vite ce carbonate d'ammoniaque devient la proie des ferments nitriques; l'azote qu'il renferme, métamorphosé en acide azotique, s'unit

aux bases du sol, chaux et potasse, et le voilà absolument mobile, prêt à être assimilé par les plantes si le sol est emblavé, à être entraîné par les eaux si la terre est découverte. Conduire du fumier frais très chargé de carbonate d'ammoniaque dans une terre légère, c'est donc s'exposer à de grandes pertes; les cultivateurs disent que ces terres dévorent le fumier : après une année, il a disparu.

Dans une terre forte, argileuse, peu perméable à l'air, il persiste plus longtemps. Ce que l'on craint dans une terre semblable c'est que, par suite du manque d'air, la nitrification qui amène l'azote à l'état essentiellement assimilable de nitrate soit trop lente : il n'y a donc pas d'inconvénient à conduire dans un sol compact du fumier frais très chargé de carbonate d'ammoniaque; la facilité de sa transformation compense la mauvaise aération du sol; en outre, dans le fumier frais, la paille encore peu altérée conserve sa rigidité; elle divise le sol, y facilite l'accès de l'air que retarde la plasticité de l'argile.

Dans le fumier frais domine le carbonate d'ammoniaque; il n'en est plus ainsi dans le fumier fait. Les ferments qui travaillent quatre ou cinq mois dans la masse accumulée sur la plate-forme ou dans les fosses, y pullulent; ils utilisent à la formation de leurs propres tissus le carbonate d'ammoniaque, comme le ferait une plante : ils en font de la matière organique complexe, infiniment plus résistante à l'action des ferments nitriques du sol que le carbonate d'ammoniaque; en outre, celui qui persiste dans le fumier fermenté y est

englobé dans la matière humique, dans la vasculose déshydratée, avec une telle énergie que des lavages prolongés sont impuissants à l'enlever. Le fumier fait renferme donc la plus grande partie de son azote à l'état insoluble, peu attaquable, de là son application aux terres légères.

De toutes les matières fertilisantes, celles qui contiennent de l'azote sont les plus efficaces, mais aussi les plus coûteuses, et les cultivateurs, qui font de grands sacrifices d'argent pour acquérir du nitrate de soude, du sulfate d'ammoniaque, du guano, etc., ont toujours été très préoccupés des pertes d'azote qu'entraîne la fabrication du fumier.

Elles sont énormes. MM. Muntz et Girard les ont mises en lumière récemment par une méthode facile à comprendre. Ces habiles expérimentateurs maintiennent pendant quelques mois, dans un bâtiment dont le sol est bitumé de façon qu'aucune infiltration de liquides ne puisse s'y produire, un lot d'animaux, de moutons par exemple, qu'on pèse au début des expériences. On pèse chaque jour les aliments fournis et on détermine l'azote qui y est contenu ; on recueille soigneusement les litières salies, les liquides émis, et on y dose également l'azote ; enfin, quand l'expérience a duré quelques mois, on pèse les animaux, on constate leur augmentation de poids : il est facile de déduire de cette augmentation la fraction de l'azote des rations qui a été fixée à l'état de viande et de laine; et comme d'autre part on connaît, par les analyses des litières

salies, des liquides évacués, l'azote entré dans la constitution du fumier, on obtient, en ajoutant l'azote fixé par les animaux à l'azote du fumier, un nombre qui devrait égaler l'azote des rations et des litières fraîches si rien n'était perdu. Il est bien loin d'en être ainsi : souvent la perte représente la moitié de l'azote initial.

Une fraction de cet azote se dissipe sous forme d'ammoniaque, dont l'odeur piquante et nauséabonde se manifeste dans les bergeries trop bien closes, ainsi que nous l'avons dit déjà ; mais une autre fraction, et la plus importante, disparaît à l'état libre.

Il est possible de diminuer les pertes d'ammoniaque qui ont lieu dans les étables ou les bergeries en saupoudrant les litières de terre sèche qui retient bien cet alcali ; il est facile également d'empêcher la déperdition, dans le fumier en voie de fabrication, à l'aide de fréquents arrosages : les sels ammoniacaux sont tellement solubles dans l'eau, qu'un fumier renfermant, ainsi que cela a lieu habituellement, les trois quarts de son poids d'humidité, ne contient pas de carbonate d'ammoniaque à l'état gazeux.

Il est très important d'en être convaincu, car, à bien des reprises différentes, on a conseillé, et tout à fait à tort, d'introduire dans le fumier : du plâtre ou du sulfate de fer en vue d'amener le carbonate d'ammoniaque volatil à l'état de sulfate d'ammoniaque fixe. Ces additions sont absolument fâcheuses, et tout d'abord la transformation du carbonate d'ammoniaque en sulfate n'est pas durable ; les sulfates sont réduits dans le tas

de fumier, amenés à l'état de sulfures, d'où l'odeur fétide de sulfure d'ammonium du purin ; ces sulfures eux-mêmes sont décomposés à leur tour par l'acide carbonique et l'eau, et l'ammoniaque se retrouve finalement à son état primitif de carbonate ; mais, durant ces transformations, les fermentations se sont arrêtées. Les bactéries en activité dans le fumier ne travaillent que dans un milieu alcalin, imprégné de carbonate de potasse et d'ammoniaque ; quand on décompose ces carbonates, la fermentation s'arrête, la masse se refroidit ; ce n'est plus qu'un mélange inerte de paille et de sels ammoniacaux dans lequel cesse la production des matières humiques qu'on a précisément dessein d'obtenir.

Il n'y a donc pas lieu de s'arrêter aux pertes d'ammoniaque : elles sont très faibles ou nulles dans un fumier bien arrosé. Quant aux pertes d'azote libre, il faut s'y résigner ; nous n'avons, actuellement, aucun moyen de les restreindre. La fermentation singulièrement énergique, qui élève à 70° la température de cette masse de matière surchargée d'humidité, ne porte pas seulement sur les hydrates de carbone : les matières azotées sont attaquées à leur tour, leur carbone et leur hydrogène complètement brûlés laissent échapper à l'état libre l'azote auquel ils étaient unis. M. Reiset, il y a plus de vingt ans, moi-même plus récemment, nous avons constaté ces pertes d'azote à l'état gazeux, et, nous le répétons, il n'existe actuellement aucun moyen de les empêcher.

Si, dans un fumier régulièrement arrosé, bien tassé, les pertes d'azote sont déjà notables, elles deviennent excessives dans une fabrication mal conduite. Un fumier éparpillé sans soins dans la cour de ferme, lavé par la pluie pendant l'hiver, desséché par le soleil pendant l'été, perd tous ses principes utiles. Cette désolante incurie est fréquente ; les prescriptions, les conseils des agronomes glissent sur l'indifférence des paysans ; depuis le vieux Caton jusqu'à nos jours, on a répété à satiété, sur tous les tons, que le succès d'une exploitation est étroitement lié à la bonne administration du fumier. Paroles inutiles ! Peines perdues ! Il suffit d'entrer dans une des fermes du Centre pour reconnaître qu'on fait aussi mal aujourd'hui que du temps des Romains.

Cette négligence est d'autant plus regrettable que, bien préparé, le fumier est un engrais d'une grande valeur. Outre les sels ammoniacaux, les matières azotées englobées dans l'humus, il renferme, en effet, toutes les matières minérales nécessaires au développement des végétaux, de l'acide phosphorique, de la potasse, de la chaux dont il est facile de trouver l'origine.

Ces matières minérales proviennent des aliments distribués au bétail; dans les grains notamment, l'acide phosphorique abonde; on le décèle aisément dans les cendres du foin, et quand les étables et les bergeries sont peuplées d'animaux adultes dont le squelette n'augmente plus, presque tout l'acide phosphorique ingéré avec les aliments se retrouve dans le fumier. Il n'est

pas de plantes qui ne renferment de potasse ; pendant longtemps, elle a été exclusivement extraite des cendres végétales, où elle se trouve à l'état de carbonate ; les acides oxalique, malique, tartrique, citrique, auxquels elle est unie dans les plantes, sont détruits pendant les combustions vives ; ils le sont également par les combustions lentes dans l'organisme animal et c'est à l'état de bicarbonate que la potasse se trouve dans les urines des herbivores ; la chaux provenant des eaux distribuées comme boisson, ou des aliments eux-mêmes formant facilement des composés insolubles, passe surtout dans les déjections solides.

Le fumier est donc habituellement un engrais complet ; et on conçoit que pendant des siècles il ait été employé comme matière fertilisante, qu'aujourd'hui même il forme la base de presque toutes les fumures. Il présente, en effet, deux qualités précieuses : par les sels ammoniacaux qu'il renferme, il exerce, l'année même de son épandage, une action marquée ; par son azote engagé dans des combinaisons complexes lentement attaquables, cette action se continue pendant de longues années.

On verra plus loin [1] quelle suite de métamorphoses subit l'azote d'une matière organique pour acquérir la forme assimilable de nitrates, je n'y insiste pas en ce moment, je veux seulement montrer comment on peut tirer de ces études l'explication de ces deux propriétés précieuses et, semble-t-il, au premier abord, contra-

1. Utilisation de l'azote du sol (page 164).

dictoires du fumier : son action est immédiate, elle est durable.

Elle varie aussi d'un sol à l'autre et, pour le bien montrer, j'ai maintenu, sans culture, des terres de natures très diverses additionnées ou non de fumier de ferme, puis j'ai cherché dans les eaux de drainage qu'elles laissaient égoutter les nitrates formés qui exercent, comme on sait, une influence décisive sur la croissance d'un grand nombre de nos plantes de grande culture. L'excédent des nitrates contenu dans les terres fumées indiquait la part que prenait à la nitrification l'azote du fumier.

Les différences sensibles dès le printemps qui suit l'épandage s'atténuent pendant les saisons suivantes : dès la première année, dans une terre légère, du tiers au quart de l'azote de la fumure est nitrifié, par suite assimilé par les vegétaux qui couvrent le sol ou entraîné par les eaux qui s'infiltrent dans les profondeurs ; dans une terre forte, la proportion n'est plus que d'un cinquième, le septième dans une terre de la Limagne d'Auvergne très chargée d'humus. Ainsi, l'année même de la fumure, une fraction de l'azote du fumier entre en jeu, mais une autre fraction et beaucoup plus importante reste en réserve. On conçoit dès lors comment il est inutile de répandre du fumier tous les ans, comment surtout les *arrière-fumures*, comme disent les cultivateurs, ont une influence si marquée ; elles se font sentir pendant de nombreuses années ; quand une terre a reçu de copieuses fumures de fumier de ferme,

elle conserve longtemps une remarquable fertilité; les cultivateurs l'ont observé depuis longtemps, et c'est là ce qui rend si avantageux les baux à long terme, si désastreux au contraire les engagements qui ne durent que peu d'années.

Quand un fermier est à fin de bail et que ce bail ne doit pas être renouvelé, il s'efforce d'utiliser les réserves que les fumures, qu'il a distribuées à son entrée et pendant sa culture, ont accumulées dans son sol; il cesse de répandre du fumier et il augmente les surfaces consacrées aux marchandises de vente; il part, laissant le sol épuisé. Le nouveau fermier est obligé de prodiguer les fumures pendant les premières années, mais elles sont bien loin de produire immédiatement tout leur effet; la fertilité ne s'improvise pas. C'est seulement après quatre ou cinq ans qu'elle est rétablie, mais déjà s'approche le terme, si, comme cela arrive souvent, le bail n'est signé que pour neuf ans; pendant les dernières années recommencera la culture épuisante, qui exigera du fermier entrant de nouveaux efforts; ainsi la terre n'acquiert pas la fertilité que lui donnerait une culture mieux aménagée, ou que lui assurerait un règlement équitable des indemnités dues au fermier sortant laissant sat erre en bon état.

On a beaucoup écrit sur le prix de revient du fumier de ferme, et on conçoit que les agronomes aient grand intérêt à l'établir avec exactitude, car ce prix du fumier entrera dans les calculs qui ont pour but d'établir le prix de revient de toutes les cultures. J'ai obtenu

800 francs de betteraves à l'hectare sur une terre qui avait reçu 40 000 kilos de fumier; mes dépenses de loyer, de semences, de main-d'œuvre, ont été de 500 francs; si je compte mon fumier à 10 francs la tonne, mes dépenses atteignent 900 francs : je suis en perte; si je compte le fumier à 5 francs la tonne, il me reste 100 francs de bénéfice.

Systématiquement j'ai employé l'expression : Je compte le fumier 10 ou 5 francs : c'est qu'en effet, ce prix est toujours une appréciation, il ne découle pas de recettes réellement encaissées ou de dépenses effectivement soldées.

On essaie de calculer le prix du fumier en faisant la différence entre la somme des recettes des vacheries, des bergeries, des écuries et les dépenses qu'entraîne l'entretien des animaux; si ces dépenses surpassent les recettes, et c'est là ce que montre habituellement la comptabilité agricole, on équilibre le compte en portant en recettes le fumier produit; en divisant enfin la somme ainsi calculée par le poids du fumier, on trouve le prix de la tonne de ce fumier.

Mais la plupart des nombres qui entrent dans ce calcul reposent sur des évaluations. J'entends bien que j'aurai des recettes réelles : de la vente du lait de mes vaches, de la laine de mes moutons, de celle des animaux gras; mais quand je voudrai écrire en recettes le travail de mes bœufs de labour, de mes chevaux transportant les marchandises à la gare voisine, je n'aurai plus aucune certitude : mon labour aura beau avoir été fait avec le

plus grand soin, si la récolte qu'il a préparée avorte, je n'en tirerai aucun bénéfice, ce labour n'a pas par lui-même de valeur; et c'est en m'appuyant sur de vagues appréciations que fictivement j'estime le travail exécuté, par un chiffre qui ne peut être qu'arbitraire.

Les difficultés ne sont pas moindres quand il s'agit d'évaluer les dépenses : visiblement, sans grande chance d'erreur, je puis évaluer au prix du marché un fourrage qui passe du magasin aux étables, en bottes régulières qu'on pourrait aussi bien charger sur un chariot et conduire à la gare ou à la ville voisine; mais beaucoup d'aliments ont une valeur difficile à chiffrer : j'ai rentré deux coupes de foin et son prix m'est connu, mais l'automne est pluvieux, mes prés reverdissent, je les fais pâturer... que vais-je inscrire aux dépenses? Quel est le prix de ce fourrage qui n'est pas fauchable? Telle qu'elle est tenue habituellement, la comptabilité agricole ne donne que des indications discutables... Il y a plus de vingt ans, j'accompagnais les élèves de Grignon dans une de leurs excursions; nous avions été reçus par un des cultivateurs les plus habiles du département du Nord; il nous avait montré une magnifique étable d'engraissement contenant plus de quatre-vingts bêtes; on le complimentait... « Vous n'avez pas de compliments à faire, nous dit notre hôte... l'étable me coûte beaucoup d'argent. — Alors, vous la laisserez se vider; quand cet engraissement sera terminé, vous n'achèterez plus d'animaux. — Mais si, mais si; il faut bien; mais je perds, vous verrez la comptabilité. — En effet les livres indi-

quaient une perte; elle était fictive; les aliments fournis en grande partie par une sucrerie appartenant à notre interlocuteur n'étaient pas payés en argent, ils étaient évalués, et l'évaluation était trop forte. La comptabilité établissait une perte sur l'engraissement, d'où un prix du fumier très élevé; et cependant l'instinct très juste qu'avait notre hôte des opérations agricoles le portait à continuer une spéculation que sa comptabilité lui disait être ruineuse.

Un élevage très bien conduit, vendant des reproducteurs de choix à prix élevés, une vacherie dont le lait est employé à la fabrication de fromages recherchés font par eux-mêmes des bénéfices et dans ces cas exceptionnels, non seulement le fumier ne coûte plus rien, mais il représente un surcroît de profit.

Habituellement, il n'en est pas ainsi, et quand les fourrages consommés et la paille des litières sont évalués au prix du marché, les recettes de la vacherie et de la bergerie ne couvrent pas les dépenses : le fumier qui comble la différence ressort, suivant les exploitations, de 5 à 10 francs la tonne.

Visiblement tous les efforts du cultivateur doivent tendre à diminuer ce prix de revient; mais alors même qu'il est élevé, il reste inférieur à sa valeur déduite du prix qu'atteignent sur le marché les diverses matières fertilisantes qu'il renferme. Si on renonce à produire du fumier, il faut acquérir des quantités d'azote, d'acide phosphorique et de potasse égales à celles que les fumures habituelles apportent au sol du

domaine; or, sans compter les matières humiques, une tonne de fumier vaut de 12 à 13 francs, par ses 5 kilos d'azote, ses 3 kilos d'acide phosphorique, ses 5 kilos de potasse ; et si mal conduites que soient les spéculations animales, elles ne font jamais ressortir le fumier à un prix aussi élevé. Aussi, malgré l'extension que prend chaque jour le commerce des engrais, la production du fumier ne cesse-t-elle que dans les exploitations voisines des grandes villes où l'on peut en acheter, et si les fermiers des environs de Paris trouvent avantageux d'abandonner toutes les spéculations sur les animaux, et de conduire au marché non seulement les grains, mais aussi les pailles et les fourrages, c'est que la ville elle-même leur cède à bas prix le fumier qu'ils ne produisent plus.

En réalité, partout le fumier de ferme reste la base de la fumure : son emploi est avantageux parce qu'il apporte les matières fertilisantes à meilleur compte qu'on ne pourrait les acquérir sur le marché ; il est nécessaire parce qu'il fournit les matières humiques, difficiles à acquérir et indispensables au maintien de la fertilité.

§ III

Gadoues. — Viande. — Sang. — Cuir. — Laine. — Guano.

Les cultivateurs des environs de Paris ont cependant une autre ressource : ce sont les immondices, les rési-

dus de cuisine, les débris de toutes sortes recueillis dès la première heure, d'autant plus rapidement qu'au lieu de s'éparpiller sur le sol, ainsi qu'on le voyait naguère, ces détritus sont réunis dans des boîtes métalliques qui sont montées dans les charrettes, basculées, vidées et remises en place en quelques instants. Réunies en grandes masses à Gentilly et à Bagneux, les *ordures* y éprouvent un mouvement de fermentation, s'oxydent, noircissent et présentent alors une composition assez analogue à celle du fumier de ferme. Des dépôts, les *gadoues*, c'est le nom que prennent ces résidus après fermentation, sont expédiées dans les gares, où les cultivateurs viennent les acheter au prix de 6 à 8 francs la tonne.

Leur emploi n'est pas sans présenter quelques inconvénients : outre l'odeur insupportable qui, pendant plusieurs jours après leur épandage, se répand dans la campagne, les fragments de verre, de potérie, de boîtes métalliques que la gadoue amène dans les champs, risquent de blesser les animaux de labour, et le ramassage entraîne quelque dépense. Quoi qu'il en soit, on trouve encore le placement de ces résidus, et si les chemins de fer consentent à les transporter à bas prix à des distances plus grandes qu'ils ne le font aujourd'hui, on n'en sera pas réduit à brûler les ordures, ainsi que cela a lieu à Londres et à Berlin.

Les grandes villes abandonnent encore à la culture d'autres débris : toutes les parties des animaux sacrifiés dans les abattoirs ne sont pas comestibles, la con-

sommation de la viande de cheval est faible, le sang, la chair non employés dans les boucheries passent aux fabriques d'engrais.

Le sang se corrompt si facilement que pour l'utiliser il faut toujours lui faire subir une préparation; on y emploie le perchlorure de fer : la coagulation du sang est très rapide; on dessèche à l'étuve et on obtient une matière noire, très riche en azote, qui se prête facilement au transport et à l'épandage.

Pour préparer les engrais de viande, on découpe les animaux en gros morceaux, que l'on dispose régulièrement dans de grandes cuves pouvant contenir de trente à trente-six chevaux; on cuit à la vapeur, l'opération dure de dix à quatorze heures; abandonnée au repos et au refroidissement, la matière se partage en trois couches; les graisses employées dans les savonneries occupent la partie supérieure, au-dessous se trouve un liquide chargé de gélatine, la couche inférieure est formée d'un mélange de sang et de chair ; soumise à la dessiccation, elle constitue un engrais renfermant encore 13 pour 100 d'azote.

Son action est beaucoup plus lente que celle du sang ; j'ai eu occasion d'employer à Grignon sur diverses cultures, en 1879, de l'engrais de viande provenant d'une usine de Saint-Denis; l'effet fut peu sensible, l'année même de l'épandage, mais il fut très marqué l'année suivante.

Le traitement que nous venons d'indiquer n'est praticable que dans de grandes usines. Il arrivait très

souvent naguère que, dans les fermes où l'on perdait des animaux atteints de maladie contagieuse, on se bornait à les enfouir, et cette habitude fâcheuse a contribué pendant bien longtemps à propager une des maladies les plus redoutées : le charbon. Nous indiquerons plus loin comment se propage le charbon, et bien que, grâce aux admirables découvertes de M. Pasteur, aux vaccinations préventives de plus en plus répandues, cette maladie tende à disparaître, on ne saurait cependant prendre trop de précautions pour empêcher sa propagation. M. Aimé Girard a indiqué, il y a quelques années, une méthode très simple qui permet de convertir les animaux qui ont péri sous les atteintes de ces maladies contagieuses, en un engrais efficace et inoffensif : il suffit de plonger les cadavres dans une cuve renfermant de l'acide sulfurique à 60° ; l'acide réduit l'animal en une sorte de bouillie noire ; on achève la saturation à l'aide de la poudre de nodules de phosphate de chaux, et on obtient ainsi une masse sèche, facile à répandre, d'une haute valeur fertilisante, et absolument débarrassée de tout germe morbide.

La culture emploie encore d'autres résidus d'origine animale, notamment la laine et le cuir ; les chiffons de laine simplement effilochés sont en usage dans les vignes depuis un temps immémorial ; le prix du chiffon varie avec celui du vin ; quand la récolte a été abondante, la qualité médiocre, le vin se vend mal, le prix du chiffon tombe, pour se relever pendant les années où les vignerons vendent cher. Ces chiffons de laine ne

s'altèrent que lentement dans le sol, et si leur action se fait sentir pendant plusieurs années, elle n'est pas assez rapide pour soutenir la végétation des plantes qui en quelques mois accomplissent leur évolution; aussi, a-t-on essayé de hâter la décomposition de la laine en la traitant, soit par de la vapeur d'eau surchauffée, soit par l'acide sulfurique; on fabrique ainsi un produit connu sous le nom de laine dissoute, ou encore d'azotine, beaucoup plus efficace que la laine brute.

Souvent cependant les vieux vêtements de laine pure sont utilisés autrement; soumis à un travail mécanique spécial, la fibre peut être tissée de nouveau; ces étoffes de médiocre qualité ont reçu un nom qui fait honneur à l'esprit inventif des fabricants, on les appelle de la renaissance : un vieux vêtement, fatigué, troué, hors d'usage, est travaillé, et sa matière première reparait avec un lustre nouveau : c'est une renaissance de la laine. Quand les tissus sont laine et coton, ce travail n'est plus possible, et l'on soumet alors ces étoffes à l'action de la vapeur d'eau surchauffée : les fibres animales se désagrègent, forment une masse noirâtre ayant l'aspect du cirage, qui vaut seulement par les 9 à 12 centièmes d'azote qu'elle renferme; quant aux fibres végétales qui ont résisté à la vapeur, elles servent à la fabrication des papiers communs.

On a également employé comme engrais azoté : les débris de cuir. Simplement moulus, ils ne se décomposent qu'avec une très grande lenteur. Mais lorsqu'ils ont été soumis à l'action de la vapeur surchauffée, ils

deviennent très friables. L'action de ces engrais azotés est assez lente ; je les ai employés au champ d'expériences de Grignon sur une culture de pommes de terre : la récolte n'a pas été augmentée. Un blé qui a succédé aux pommes de terre n'a guère bénéficié non plus de cet engrais enfoui dans le sol l'année précédente, et je commençais à désespérer d'en tirer le moindre parti, quand il marqua d'une façon très sensible, sur un second blé, par conséquent trois ans après son épandage [1].

Les tournures de corne, ou les cornes torréfiées sont plus actives; aucun de ces engrais d'origine animale ne vaut cependant le guano qui, après avoir été très employé pendant une trentaine d'années, est aujourd'hui un peu délaissé depuis que les dépôts les plus riches commencent à s'épuiser. On trouve du guano sur un grand nombre d'îlots où les oiseaux de mer viennent se réfugier : ils couvrent le sol de leurs déjections au milieu desquelles sont souvent enfouis leurs cadavres momifiés.

Le guano le plus recherché parce qu'il renfermait, outre du phosphate de chaux, des quantités notables d'ammoniaque unie aux acides carbonique, urique et oxalique, se trouvait sur des îlots voisins de la côte du Pérou ; les oiseaux pêcheurs pullulent sur cette côte.

Suivant Antonio de Ulloa qui accompagna en Amé-

1. On estime à 51 000 tonnes la quantité de sang et de viande livrée chaque année au commerce des engrais; la part de la France serait de 8 000 tonnes environ ; elle fabriquerait en outre 8 500 tonnes d'engrais de cornes et de cuirs.

rique les académiciens français, qui y furent envoyés au XVIIIe siècle pour mesurer un arc du méridien, « quand les oiseaux commencent à traverser le port de Callao, on n'en voit ni le commencement ni la fin ». Ces oiseaux sont attirés sur cette côte par l'extraordinaire abondance du poisson qui peuple le courant de Humboldt, apportant dans ces régions chaudes les eaux froides de l'Océan Glacial du sud ; le courant remontant directement vers le nord, baigne toute la côte jusqu'à l'équateur.

L'illustre agronome français Boussingault, qui a parcouru l'Amérique centrale au commencement du siècle, vit ces gisements de guano, c'est en réfléchissant à leur composition, qu'il arriva à formuler pour la première fois son opinion sur l'efficacité des engrais azotés. « Sur une grande étendue de la côte du Pérou, le sol, qui est naturellement stérile, est rendu fertile par l'application du guano ; la terre, composée d'un sable quartzeux mêlé d'argile, produit alors des récoltes abondantes. L'engrais qui opère un changement si prompt et aussi favorable est formé presque exclusivement de sels ammoniacaux. C'est en présence de ce fait qu'en 1822, époque à laquelle je me trouvais sur les côtes de la mer du Sud, j'adoptai l'opinion que je professe encore aujourd'hui, sur l'utile intervention des sels à base d'ammoniaque dans les phénomènes de la végétation. »

Il y a vingt ans, les guanos provenant des localités où la pluie est rare, ayant conservé tous les sels ammoniacaux solubles qui ailleurs sont facilement entraînés par les eaux pluviales, étaient encore communs ; ils

étaient chargés en vrac dans les bateaux qu'on ne pouvait consacrer à un autre usage, tant l'odeur répandue par le guano est forte et repoussante ; un grand nombre de ces bâtiments arrivait à Nantes, où l'engrais était emmagasiné. On achetait à ce moment le guano, à un prix assez élevé, sans exiger de garantie de composition : bientôt cependant les gisements les plus riches s'épuisèrent, l'efficacité devint moindre, et on ne voulut plus acheter que sur analyse. Or, la composition de ces engrais est loin d'être constante ; les manipulations ayant pour but de faire des mélanges uniformes sont difficiles ; le guano, mou et plastique, s'agglutinant aisément, encrasse les appareils ; pour réussir à le triturer, on le traite par l'acide sulfurique, on prépare ainsi le *guano dissous* ; l'acide décompose le carbonate d'ammoniaque, le transforme en sulfate d'ammoniaque ; en outre le phosphate de chaux est attaqué également, une partie de la chaux forme avec l'acide sulfurique du plâtre qui fait prise et englobe la matière ; elle est alors devenue assez dure pour passer facilement au travers d'appareils broyeurs et acquérir l'homogénéité nécessaire à la vente sur analyse. Ces manipulations transforment au reste le guano en un mélange de sulfate d'ammoniaque et de superphosphate de chaux, et dès lors, il subit la concurrence des engrais chimiques qui ont fait cesser l'engouement dont le guano a été l'objet, au moment où le mode d'action des engrais était moins connu qu'il ne l'est aujourd'hui.

Les déjections des oiseaux de mer ne sont pas seules

employées; on fait usage également, sous le nom de colombine, des produits extraits de tous les locaux où séjournent les volailles; on rencontre en outre, dans quelques grottes habitées par les chauves-souris, un engrais tout à fait analogue au guano. Enfin on a essayé à diverses reprises d'utiliser à la fabrication des engrais tous les résidus des pêcheries. Sur notre côte bretonne, avec les parties non comestibles des sardines; aux îles Loffoden en Norvège; à Terre-Neuve où s'accumulent les résidus de la pêche de la morue, on a fabriqué des engrais de poisson. En soumettant à l'action de la vapeur d'eau surchauffée tous ces débris, on en extrait de l'huile, puis toute la masse devient dure, cassante, passe facilement au moulin, et forme une poudre commode à répandre.

§ IV

Matières excrémentitielles. — Sulfate d'ammoniaque. Nitrate de soude.

L'emploi des matières excrémentitielles humaines est très localisé; il n'est qu'un petit nombre de contrées où les cultivateurs ont surmonté la répugnance très légitime que provoquent ces engrais. Une longue accoutumance a rendu les Chinois insensibles aux inconvénients qu'entraîne le transport constant sur les routes, dans les rues, de ces matières nauséabondes; leur efficacité

comme engrais est telle, qu'aujourd'hui le Céleste-Empire est peut-être le pays du globe où la population présente la plus grande densité. En France, aux deux extrémités du territoire, on fait usage des matières excrémentitielles depuis un temps immémorial : dans le Var, les Alpes-Maritimes, ces engrais sont répandus dans la culture des plantes à fleurs qui alimentent les parfumeries; et, tout à fait au Nord, dans l'ancienne Flandre, les matières fécales sont d'un usage tellement constant, qu'elles ont reçu le nom d'engrais flamand.

Leur emploi implique la conservation des fosses d'aisance qui présente de terribles inconvénients et tout d'abord au point de vue de la salubrité : ces fosses, rarement étanches, laissent suinter, par le fond ou les parois, les liquides nauséabonds qu'elles renferment; ils contaminent les terres voisines et les nappes d'eau souterraines. On ne trouve habituellement dans l'eau des puits salubres que des traces d'ammoniaque : or, il y a quarante ans, Boussingault dosait, dans les puits des maisons du vieux Paris, jusqu'à 30 milligrammes d'ammoniaque par litre; quantité énorme, visiblement due à des infiltrations des liquides des fosses. La consommation d'eaux semblables, toujours horriblement répugnante, devient terriblement dangereuse en temps d'épidémie, puisque nous savons aujourd'hui que le choléra et la fièvre typhoïde se propagent par les germes contenus dans les eaux contaminées.

Bien que l'extraction des matières des vidanges ait été perfectionnée depuis quelques années; bien que les gaz qui s'échappent soient lancés au travers d'un foyer qui brûle les produits volatils à odeur forte, de telle sorte que la vidange des fosses d'une maison n'empeste plus toute une rue, ainsi que cela se produisait naguère, le procédé actuel est barbare et doit disparaître.

Que chaque maison recèle au-dessous d'elle des mètres cubes de liquide infect dont les émanations remontent dans les habitations à toutes les baisses barométriques; qu'il faille extraire ces liquides par des moyens mécaniques et les charrier à grand bruit au travers de la ville, pendant la nuit, troublant ainsi le sommeil des habitants; que la nécessité de répéter ces opérations coûteuses s'impose d'autant plus fréquemment que l'eau pure arrive en plus grande abondance dans les maisons; et que par conséquent l'intérêt des propriétaires, auxquels incombent les frais de vidange, soit de restreindre les larges irrigations des cabinets d'aisance, c'est là ce qui est intolérable.

Le système des fosses est donc condamné, il l'est d'autant plus que la préparation des engrais par le traitement des vidanges devient chaque jour plus difficile.

Les matières extraites des fosses ont été longtemps conduites dans les dépotoirs; on les y abandonnait au repos, pour que la partie solide se déposât. Ce dépôt est très lent; les matières exposées à l'air empestent de leurs émanations les localités voisines, et, quand le

vent souffle de l'est, tout Paris. Les matières solides finissent par se dessécher, elles forment la poudrette, engrais d'une médiocre richesse, car la partie active des vidanges, les sels ammoniacaux, restent dans les liquides ou s'exhalent pendant la dessiccation : les liquides ont été longtemps jetés à la Seine. Aujourd'hui, plus habituellement, les matières sont conduites directement aux usines ; à l'aide d'appareils analogues à ceux qu'on emploie dans la distillation de l'alcool, on sépare des liquides l'ammoniaque gazeuse, qui est recueillie dans de l'acide sulfurique : on prépare ainsi un engrais puissant, le sulfate d'ammoniaque. Cette préparation entraîne une dépense qui n'est couverte qu'autant qu'on distille un liquide riche en ammoniaque. Or, il l'est d'autant plus qu'il provient de maisons plus mal tenues. Quand, au contraire, l'eau abonde, que les cabinets sont largement irrigués, l'ammoniaque se trouve diluée dans une telle masse de liquide, que la dépense qu'entraîne la distillation surpasse la valeur du produit obtenu, et comme nombre de villes, Paris notamment, ont fait de grands efforts pour que les eaux arrivent partout en abondance, la fabrication du sulfate d'ammoniaque à l'aide des vidanges deviendra de moins en moins avantageuse et finira par disparaître, quand bien même les fosses seraient maintenues.

Le sulfate d'ammoniaque ne provient pas exclusivement du traitement des liquides excrémentitiels ; on sait que la houille a été formée par la transformation des plantes qui couvraient la surface de la terre à des

époques reculées; or les végétaux de la période houillère renfermaient de l'azote, comme nos végétaux actuels, et quand on distille de la houille pour en extraire le gaz de l'éclairage, on recueille des eaux ammoniacales; elles sont employées à la fabrication du sulfate d'ammoniaque; la préparation du gaz consommé à Paris fournit environ, chaque année, 8 000 tonnes de sulfate d'ammoniaque [1].

Le sel provenant de la distillation de la houille renferme parfois un produit qui agit sur les végétaux à la façon d'un poison violent : le sulfocyanure de potassium; et les chimistes des stations agronomiques, des syndicats agricoles, s'assurent de son absence dans les lots de sulfate d'ammoniaque dont l'odeur empyreumatique décèle l'origine houillère [2].

Le sulfate d'ammoniaque est d'un emploi récent, concurremment avec le nitrate de soude : il constitue la base de ces engrais azotés, très actifs, qui sont désignés dans le langage courant sous le nom bizarre d'engrais chimiques.

C'est seulement en 1856 que l'efficacité des nitrates

1. Nous trouvons dans un journal spécial, très bien informé, l'*Engrais*, que la fabrication du sulfate d'ammoniaque dans le monde s'élève à 290 000 tonnes sur lesquelles l'Angleterre, à elle seule, produirait 154 000 tonnes, la part de la France ne serait que de 26 000 tonnes.

2. Rien n'est plus facile que de constater la présence du sulfocyanure de potassium dans un engrais; il suffit de dissoudre un peu de produit suspect dans l'eau et d'ajouter du perchlorure de fer qui donne, avec le sulfocyanure, une magnifique coloration rouge.

comme engrais azoté a été nettement établie par Boussingault et par M. Georges Ville ; lentement d'abord, puis rapidement, quelques années plus tard, l'usage de cet engrais s'est répandu, et en 1894, l'Europe a importée 974 219 tonnes de nitrate de soude valant 210 francs la tonne : la dépense d'acquisition a donc été de 205 millions de francs. Dans cette importation totale, la France a compté pour 173 mille tonnes ; elle en avait acquis 216 000 tonnes en 1890 et 204 000 en 1892. (L'*Engrais*, nº du 29 mars 1895.)

Le nitrate de soude provient d'un immense gisement situé dans l'Amérique du Sud, sur la côte du Pacifique, dans la province de Tarapaca (Pérou), et dans le désert d'Atacama (Bolivie). Nous savons que les oiseaux pêcheurs, très abondants sur cette côte, ont produit le guano qu'on a exploité naguère, et il est probable que le nitrate de soude tire son origine d'anciens bancs de guano. Au-dessous d'argile agglutinée par du sel marin se trouvent les couches renfermant le nitrate ; on concasse la masse saline à coups de mine, puis, profitant de la solubilité du nitrate dans l'eau, on le sépare de sa gangue terreuse, en plaçant dans de grandes chaudières les fragments de la *caliche :* c'est ainsi qu'on désigne le mélange de sable, de nitrate et de sel marin, qu'on porte à l'ébullition ; on décante le liquide saturé, le nitrate cristallise par refroidissement, tandis que le sel marin reste en dissolution.

L'emploi régulier du nitrate de soude et du sulfate d'ammoniaque marque une des étapes du progrès agri-

cole. La production du fumier est limitée par les ressources fourragères, son épandage est parfois gêné par les conditions climatologiques : les terres argileuses, détrempées par la pluie, sont inabordables aux lourds chariots de la ferme ; l'action même de ce fumier est également subordonnée aux influences saisonnières ; par suite, on conçoit sans peine quels avantages tire la culture d'engrais de faibles poids, très faciles à répandre et d'un effet immédiat.

Au printemps un blé est languissant, les feuilles sont petites, pâles, jaunâtres : naguère on était fort empêché; aujourd'hui on distribue de 100 à 150 kilos à l'hectare de nitrate de soude; en huit jours l'aspect est changé, les plantes traitées sont plus hautes, plus vigoureuses, d'un vert plus foncé que leurs voisines; la végétation repart sous l'influence du nitrate comme un attelage fatigué, stimulé d'un coup de fouet.

Si le nitrate de soude et le sulfate d'ammoniaque sont de puissants agents de fertilité, ils n'exercent d'action sur les récoltes qu'autant qu'ils sont employés avec discernement. Le nitrate de soude est très soluble dans l'eau, les dissolutions filtrent au travers du sol sans changement, de telle sorte que ce serait une très grosse faute que de le distribuer à l'automne sur des terres nues, ou même sur de jeunes plantes encore peu vigoureuses, qui ne pourraient le retenir entièrement : le nitrate serait dissous, entraîné, perdu. Il n'en est pas entièrement de même du sulfate d'ammoniaque : tant que l'azote qu'il remferme persiste à l'état d'ammo-

niaque, il se conserve assez bien dans le sol et les eaux n'en entraînent qu'une faible fraction; mais quand les conditions de température et d'humidité sont convenables, l'ammoniaque est saisie par les ferments nitriques, et son azote uni à l'oxygène devient acide nitreux, puis acide nitrique; il se combine à la chaux et, sous cette nouvelle forme, il est facilement entraîné. Mais, quoi qu'il en soit, cette transformation est toujours assez lente en hiver et quelques praticiens éclairés trouvent avantageux de donner dès l'automne, aux jeunes semis de blé peu vigoureux, une légère fumure de sels ammoniacaux. Dans la plupart des cas cependant, l'épandage du printemps est plus efficace.

Il n'est pas indifférent d'employer sur un sol quelconque du nitrate de soude ou du sulfate d'ammoniaque : le premier convient aux terres sèches, calcaires, le second aux terres humides et argileuses. On cite dans les cours de chimie agricole une très jolie observation recueillie à Woburn, en Angleterre, par M. Warington : en 1882, saison humide, la récolte de blé la plus forte, s'élevant à 39^{hlit},23 à l'hectare, fut obtenue à l'aide du sulfate d'ammoniaque; une dose de nitrate de soude renfermant la même quantité d'azote que le sulfate d'ammoniaque avait donné seulement 32^{hlit},24. En 1887, pendant une année sèche, les rendements furent exactement inverses : le nitrate de soude donna 39^{hlit},46, et le sulfate d'ammoniaque 32^{hlit}, 92. Il est clair que le praticien qui répand les engrais chimiques sur du blé au mois de mars ne sait pas quelle saison se prépare

et s'il aura à souffrir de l'humidité ou de la sécheresse ; mais, il connaît sa terre. Si elle est forte, qu'elle retienne bien l'eau, qu'elle fournisse les meilleures récoltes pendant les années chaudes et sèches, c'est le sulfate d'ammoniaque qui convient; si, au contraire, la terre est filtrante, qu'on réussisse mieux quand la pluie est abondante que lorsqu'elle est rare, c'est le nitrate de soude qu'il faut employer.

Dans tous les cas, il faut se garder des doses excessives : elles déterminent une végétation herbacée du blé qui retarde la maturation et prédispose à la verse; elles maintiennent vertes les betteraves à l'arrière-saison et diminuent leur teneur en sucre. Il y a rarement avantage à dépasser 300 kilos à l'hectare, de 100 à 150 kilos suffisent habituellement.

Contrairement au fumier de ferme, qui soutient la végétation plusieurs années après son épandage, les engrais chimiques ne marquent que l'année même où ils ont été employés. Si leur effet a été peu sensible, qu'une pluie intempestive ait entraîné le nitrate de soude dès le premier printemps, qu'une sécheresse prolongée ait empêché l'assimilation du sulfate d'ammoniaque, il faut se résigner à les considérer comme perdus et ne pas espérer qu'ils exerceront la moindre action l'année suivante ; les résidus qu'ils ont laissés dans le sol disparaîtront pendant l'hiver; aussi ces engrais ne doivent-ils servir qu'à compléter les fumures organiques. Un fermier qui n'a pas assez de fumier pour couvrir toute la surface à ensemencer fait plus

sagement de distribuer une petite fumure de fumier à toute cette surface et de compléter avec des engrais chimiques, que de répandre tout son fumier sur un champ et tous les engrais chimiques sur un autre; les fumures mixtes sont chaque jour plus appréciées [1].

§ V

Engrais végétaux. — Tourteaux. — Engrais verts.

Les engrais d'origine animale que nous venons de longuement énumérer, et particulièrement le sulfate d'ammoniaque et le nitrate de soude, dont la consom-

1. On s'est préoccupé, dans ces derniers temps, d'expériences exécutées en Allemagne par M. Wagner, qui montreraient que les nitrates donnés à un sol en même temps que du fumier de ferme seraient décomposés et par suite perdus.

Il est certain que, dans nombre de circonstances, les nitrates sont réduits; il suffit, par exemple, de maintenir une terre renfermant des nitrates, très humide, pour voir ces nitrates disparaître, et il est vraisemblable que les expériences de M. Wagner ont été faites dans des terres fortes peu accessibles à l'air; mais, si intéressants que soient ces travaux, il ne faudrait pas en conclure que les fumures mixtes : fumier, nitatres, doivent être proscrites.

A Grignon, où je cultive une terre, légère il est vrai, j'emploie depuis nombre d'années avec grand avantage, ces fumures mixtes, mais je ne me suis jamais placé dans les conditions où M. Wagner a opéré; le fumier est distribué à l'automne et le nitrate au printemps; je crois qu'en opérant ainsi on n'a nullement à craindre la réduction des nitrates, si les terres sont bien travaillées et aérées. A l'abri de l'air au contraire la réduction des nitrates est certaine, ainsi que l'ont montré les travaux de MM. Gayon et Dupetit et ceux que j'ai exécutés en même temps (1881) avec la collaboration de M. Maquenne.

mation s'accroît chaque année, sont donc des engrais complémentaires. Leur action fertilisante vient s'ajouter à celle du fumier de ferme, qui dans la majeure partie de notre pays reste l'engrais fondamental. Toutefois, si dans le nord et le centre de la France, les pluies abondantes favorisent l'établissement des prairies, par suite l'entretien du bétail, et naturellement la production du fumier, il n'en est plus ainsi dans le sud-est et notamment en Provence. A l'aide des irrigations, on y obtient cependant d'admirables récoltes de foin et de luzerne, mais on trouve plus avantageux de les vendre que de les employer à l'alimentation des animaux. Si l'industrie laitière s'était établie en Provence comme dans le Milanais, il n'en serait pas ainsi, car si les prairies des environs de Milan régulièrement arrosées fournissent des rendements tels qu'elles se louent 500 francs l'hectare, celles de Provence, partout où l'eau arrive, ne sont pas moins belles. Je ne crois pas qu'il soit possible de voir ailleurs une démonstration plus saisissante de la transformation qu'amène dans une contrée l'arrivée des eaux d'irrigation. Aux environs de Marseille, on parcourt au printemps des prairies dont l'herbe bien verte, touffue, épaisse, est ombragée par des pommiers en fleurs, et si, à l'horizon, on ne voyait miroiter la mer de ce bleu sombre, violent, inconnu à la Manche, on se croirait en Normandie ; puis, on s'élève de quelques mètres et au-dessus des pentes verdoyantes qu'on vient de quitter, là où l'eau n'arrive plus, on retrouve la colline grise, sèche,

couverte des aiguilles que laissent tomber de maigres pins rabougris, languissant sous les ardeurs du soleil.

Quoi qu'il en soit, le fumier de ferme fait défaut en Provence, pour soutenir les belles cultures de fleurs de Saint-Rémy, celles de légumes de Cavaillon, et le blé, et la vigne, et l'olivier; et l'on aurait été très empêché, si l'on n'avait trouvé un engrais précieux dans les résidus de l'extraction de l'huile des graines oléagineuses, dans les tourteaux.

On sait que les savonneries de Marseille importent de grandes quantités de graines exotiques. Or ces graines renferment, comme celles qui mûrissent sous notre climat — comme notre colza, notre lin, ou notre pavot — outre de l'huile, des matières azotées et des substances minérales riches en acide phosphorique et en potasse. Quand la graine est moulue, que par la pression on en a extrait l'huile, le *tourteau* restant sert, suivant sa nature, à l'alimentation du bétail ou à la fumure du sol. Si les tourteaux de lin, de colza conviennent dans le premier cas, ceux de ricin, de croton, de pignon d'Inde, de moutarde, dangereux pour les animaux, sont pulvérisés et vendus comme engrais; très employés dans toute la région méridionale, ils y portent le nom de *trouille*. On estime à 620 000 tonnes, valant 62 millions de francs, la quantité de tourteaux annuellement consommée en France.

Les tourteaux ne sont pas les seules matières d'origine végétale employées comme engrais; depuis un

temps immémorial, on fait usage, sur les côtes, des plantes marines ; la pêche en a même été réglée dès le moyen âge : on distinguait le goémon d'épave, celui qui entraîné par les vagues vient échouer sur la grève, du goémon de coupe directement exploité sur les rochers voisins du littoral. Les uns et les autres, exposés à la pluie pendant quelque temps, perdent le sel dont ils sont imprégnés ; enfouis alors dans le sol, ils s'y décomposent facilement et suffisent à soutenir les récoltes. Hervé-Mangon a décrit, il y a déjà plusieurs années, le mode de culture très particulier, suivi à Noirmoutiers, dont le sol conserve depuis des siècles une fertilité moyenne par l'emploi exclusif des goémons ; les déjections solides du bétail sont séchées et employées comme combustible, remplaçant le bois qui fait défaut. Pendant leur calcination, les matières animales laissent échapper des eaux ammoniacales et on assure que si l'azoture d'hydrogène, l'alcali volatil, est encore désigné sous le nom d'*eau égyptienne*, d'*eau* d'*Ammon*, d'*ammoniac*, c'est que cette base nous est venue d'Égypte ; l'absence de bois dans la vallée du Nil y ayant toujours fait employer comme combustible les déjections animales.

J'ai eu occasion, il y a une dizaine d'années, de parcourir l'île de Ré : à cette époque elle était entièrement couverte de vignes ou de céréales ; pas de prairie, par suite, pas de bétail ; le goémon seul servait d'engrais. C'est encore à lui que Jersey doit sa prospérité ; on sait que grâce à la culture des primeurs pour le marché de Londres, le produit brut à l'hectare y atteint de 1 800 à

2 000 francs. Enfin la ceinture dorée de la Bretagne, cette région voisine du littoral où la culture est luxuriante, ne doit sa richesse qu'à l'emploi simultané des goémons et des sables marins, apportant les uns les matières azotées, les autres le calcaire, qui font défaut dans l'intérieur du pays.

Les tourteaux et les goémons ne sont pas les seules matières fertilisantes que le règne végétal fournisse à la culture, il lui donne encore les engrais verts. On désigne sous ce nom les plantes cultivées spécialement pour être incorporées au sol qui les a portées et les débris laissés par les récoltes dont une partie seulement est utilisable par l'industrie.

Il est extrêmement curieux de constater que les cultivateurs de l'antiquité aient reconnu que certaines plantes sont particulièrement avantageuses à enfouir dans le sol comme engrais vert. Il y a plus de vingt siècles que les agronomes latins conseillaient de semer la vesce ou le lupin pour les retourner au moment de la floraison et enrichir ainsi les terres inaccessibles aux chariots chargés de fumier. Ce choix est absolument justifié, nous savons aujourd'hui, grâce aux recherches récentes de MM. Hellriegel et Wilfarth, que les diverses plantes appartenant à la famille des légumineuses, portent souvent sur leurs racines des nodosités peuplées de bactéries fixatrices d'azote gazeux; que, par suite, ces plantes enrichissent d'azote le sol qui les a portées et méritent absolument le nom de plantes améliorantes que leur ont donné les cultivateurs, bien

avant qu'on eût découvert le rôle capital qu'elles remplissent dans le maintien de la fertilité.

Dans les contrées où le loyer de la terre est élevé, nous ne consentons pas à sacrifier toute une saison pour obtenir une plante destinée à être enfouie comme engrais ; nous tournons la difficulté par deux méthodes différentes : ou bien nous semons du trèfle dans une avoine, ou bien nous donnons après la moisson un léger labour du déchaumage, puis nous semons de la vesce : ces deux plantes occupent le sol pendant tout l'automne, mais tandis que le trèfle est conservé, passe l'hiver, donne deux coupes l'année suivante et n'est enfoui qu'après avoir vécu seize mois, la vesce, qui gèle facilement, est retournée par les grands labours de novembre.

Quand la culture a réussi, les plantes enterrées pèsent de 15 000 à 18 000 kilos ; elles renferment de 60 à 80 kilos d'azote correspondant à 12 000 ou 16 000 kilos de fumier de ferme, c'est une petite fumure.

Les plantes enfouies ne se décomposent qu'au printemps suivant, où l'azote qu'elles renferment reparaît à l'état de nitrates. La décomposition des végétaux enterrés est lente ; en effet, avant que leurs tissus aient été la proie des insectes, des champignons, des bactéries, un temps assez prolongé s'écoule, et il arrive même qu'on ne retrouve pas pendant l'année suivante, à l'état de nitrate, tout l'azote que la culture dérobée a maintenu dans le sol ; on l'a enrichi en cet humus dont nous avons reconnu la stabilité.

Quoi qu'il en soit, la terre a conservé un élément de richesse qui est habituellement perdu ; quand, ainsi que le recommandaient déjà les agronomes latins, ce sont des légumineuses qu'on sème à l'automne, à l'azote des nitrates vient s'associer l'azote de l'air fixé par les bactéries des nodosités, et l'opération devient ainsi plus profitable ; il est vraisemblable que ce mode de culture, encore cantonné dans quelques-uns de nos départements, s'étendra à mesure qu'on en connaîtra mieux les avantages.

Ce semis des cultures dérobées d'automne en usage dans quelques-uns de nos départements depuis un temps immémorial, tend à se généraliser, et il se répandra d'autant plus vite qu'on comprendra mieux le très grand avantage qu'il présente de diminuer les pertes d'azote nitrique entraîné à l'automne par les eaux qui s'infiltrent dans les profondeurs.

Pendant l'hiver 1892-1893, une terre de Grignon découverte laissait couler des eaux de drainage infiniment plus chargées d'azote nitrique que celles qui avaient traversé une prairie de graminées ; les eaux qui traversent les cultures de blé d'automne sont aussi pendant l'hiver beaucoup moins chargées que celles des terres découvertes.

Ainsi les nitrates sont retenus ; comment le sont-ils ? Pendant l'hiver la croissance des plantes est ralentie, la formation des principes immédiats azotés faible ou nulle ; les nitrates que les eaux de drainage n'avaient pas entraînés, que l'activité vitale n'avait pas trans-

formés, devaient se retrouver en nature dans les tiges, et en effet il est facile de les y caractériser [1]. Ils sont engagés dans une combinaison assez stable pour résister aux lavages à l'eau froide; un de mes élèves, M. Demoussy, a montré qu'il faut tuer la cellule à l'aide du chloroforme ou par la dessiccation pour lui arracher les nitrates qu'elle renferme. Pendant l'hiver les plantes herbacées emmagasinent dans leurs racines et leurs tiges les nitrates qu'ils utiliseront au réveil de la végétation au printemps, et cette curieuse propriété explique comment les pertes par les eaux de drainage s'atténuent dans les terres emblavées.

Cette propriété des racines de presque toutes les plantes de retenir les nitrates explique très bien comment on peut substituer à la vesce, généralement employée comme engrais vert, d'autres plantes à végétation rapide, du colza, de la moutarde, qui sont enfouies à l'automne.

Pendant les années où les fourrages sont rares, il est plus avantageux de semer en cultures dérobées, des raves, des navets destinés à la nourriture des animaux. Dans tous les cas, on évite les pertes considérables de nitrates que les eaux entraînent à l'automne de toutes les terres découvertes.

1. Nous avons actuellement dans les laboratoires un réactif qui nous permet de caractériser très nettement de faibles quantités de nitrates, c'est le sulfate de diphénylamine; en présence de ces sels il prend une coloration bleu indigo; or si, en hiver, on arrache quelques racines de graminées ou de légumineuses, qu'on les sèche à 100°, puis qu'on y ajoute du sulfate de diphénylamine, on leur voit prendre une coloration bleue, démontrant qu'elles sont gorgées de nitrates.

Toutes les plantes que nous cultivons abandonnent au sol qui les a portées, des résidus, des débris qui servent à l'alimentation des récoltes suivantes : ce sont encore des engrais végétaux mais de valeur très inégale. Si les racines et les chaumes des céréales, les fanes de pommes de terre ne présentent qu'une médiocre richesse, il n'en est plus ainsi des feuilles qui restent sur le sol après le fanage du foin des prairies artificielles et des racines qu'elles laissent dans le sol. De toutes les plantes de grande culture, c'est cependant la betterave qui fournit les résidus les plus abondants ; on ne conduit aux sucreries, aux distilleries, ou même aux silos que les racines ; le *collet* qui porte encore les feuilles est séparé au moment de la récolte et reste sur le sol ; or la bettarave est une plante bisannuelle ; quand à la fin de la première saison, sa végétation est brusquement interrompue par l'arrachage, les feuilles encore bien vertes sont très chargées de matières azotées et quand on les laisse en tas sur le sol exposées à l'air humide, elles se décomposent très vite ; après quelques jours on perçoit une très forte odeur d'ammoniaque qui montre à quelles pertes on s'expose quand on tarde à enfouir ces résidus ; quand, au contraire, on les enterre rapidement, on peut compter qu'ils équivalent à une bonne demi-fumure de fumier de ferme.

Il y a quelques années, j'ai fait succéder, dans mes cultures de Grignon, du maïs fourrage à des betteraves ; l'arrière-saison avait été pluvieuse, les voitures avaient peine à pénétrer dans les terres pour enlever les racines.

et les tas de betteraves qu'on avait pris la précaution de recouvrir de feuilles afin de les préserver de la gelée restèrent sur le sol un peu plus longtemps qu'à l'ordinaire. Or, l'année suivante, dès le mois de juin, la végétation du jeune maïs marquait très clairement les places où avaient séjourné les tas de betteraves : ces places étaient nettement dessinées par de grosses touffes où les tiges étaient plus hautes, plus vigoureuses, les feuilles plus vertes que celles du maïs qui couvrait le reste du champ ; on avait sous les yeux une démonstration éclatante de la valeur comme engrais de ces résidus, et en outre de la négligence qu'on avait mise à enlever les betteraves à l'automne précédent. Les cultivateurs sont humiliés quand, au printemps, ils voient dans un champ des places où les plantes sont plus vigoureuses que les autres, c'est une preuve que les engrais ont été mal distribués.

Si riches en azote combiné, en humus, que soient les engrais organiques, leur action est faible ou nulle. ainsi qu'il a été dit au début de cet écrit, quand ils sont distribués à des terres où font défaut les matières minérales nécessaires au développement des plantes. Quelles sont les matières désignées sous le nom d'engrais minéraux : où la culture peut-elle se les procurer ; comment doit-elle les employer ? C'est là ce que nous exposons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

AMENDEMENTS ET ENGRAIS MINÉRAUX.

Pour que nos récoltes prospèrent, il faut que tous les individus de la même espèce qui croissent, à côté les uns des autres, dans le même champ, trouvent à chaque période de leur vie tous les aliments qui leur sont nécessaires; il faut que le magasin dans lequel puisent les racines soit copieusement garni, non seulement de matières azotées, d'humus, dont nous avons indiqué les origines dans le chapitre précédent, mais aussi de matières minérales. Quelques-unes d'entre elles sont directement assimilées par les végétaux : ce sont des aliments au même titre que les nitrates et les sels ammoniacaux, et le nom d'engrais minéraux leur convient. Il ne convient plus à d'autres substances, employées avec grand avantage, et qui ne sont pas utilisées directement : on sait, par exemple, que le plâtre ou sulfate de chaux répandu sur les prairies artificielles augmente les récoltes, parfois il les double ; cependant, quand on détermine la composition des cendres d'un trèfle plâtré, on n'y trouve pas plus d'acide sulfurique que dans les cendres d'un trèfle qui n'a pas reçu de plâtre : ce sel

n'a donc pas pénétré en nature dans la plante, comme l'aurait fait un nitrate ou un phosphate, le plâtre n'est donc pas un engrais, c'est une matière destinée à agir sur la terre pour modifier, métamorphoser les substances qu'elle renferme à l'état insoluble, pour les rendre assimilables ; c'est un amendement. Il n'en est plus tout à fait de même de la marne et de la chaux, dont nous allons nous occuper d'abord : elles sont à la fois engrais et amendements.

§ I

Amendements calcaires.

Pour que ces amendements calcaires exercent leur action, il faut qu'ils soient incorporés à la terre, ce qui n'est possible qu'autant qu'ils sont réduits en poudre. Or, on trouve dans un grand nombre de terrains, souvent à une faible profondeur, des pierres formées d'un mélange de carbonate de chaux et de matières argileuses, désignées sous le nom de marnes, qui se délitent dans l'eau et se réduisent en poudre sous l'influence de la gelée : quand une marne déposée dans un champ est mouillée, l'argile qu'elle renferme se délaie : de là des ruptures dans la masse, qui se réduit déjà en menus fragments. A cette première action de la pluie se joint, pendant l'hiver, la force expansive de la gelée : la marne gorgée d'eau, grâce à l'argile qu'elle renferme,

se pulvérise au moment où l'eau augmente de volume en se solidifiant, et dès lors la poudre calcaire répandue sur le sol peut y être incorporée par les labours.

Il semble que l'emploi de la marne remonte à une haute antiquité; au moins Pline rapporte-t-il que les Gaulois et les Bretons en faisaient usage. Pendant les temps troublés du moyen âge, l'épandage de la marne se conserva dans certaines contrées, notamment sur le plateau argileux de la Brie, dans le Valois : c'est là que Bernard de Palissy apprécia son heureuse influence et que, désireux de propager en Saintonge l'usage de la marne, où il paraissait inconnu, il lui consacra, en 1580, un de ses fameux dialogues entre *Théorique* et *Practique*.

Bien que depuis les époques les plus reculées les hommes aient su calciner les calcaires pour les transformer en chaux, en séparant l'acide carbonique auquel la chaux est unie dans le marbre, la pierre à bâtir, etc., qu'ils aient remarqué, en outre, que la chaux, mouillée après calcination, se gonfle, foisonne, puis se brise et finit par tomber en poussière si blanche qu'elle a reçu le nom de farine de chaux, il ne semble pas qu'on ait habituellement employé la chaux aux usages agricoles avant le XVIIe siècle; on admet généralement que c'est dans le *Théâtre d'Agriculture* d'Olivier de Serres, écrit au commencement du XVIIe siècle, que pour la première fois son emploi a été préconisé.

Il n'a pu, toutefois, prendre d'extension que lorsque la construction des chemins de fer a facilité les trans-

ports. L'arrivée de la chaux du Berry en Limousin a métamorphosé le pays. Quand au XVIIIe siècle Arthur Young le parcourt, il est ravi des sites riants qu'il rencontre à chaque étape et navré de leur solitude; la population, écrasée par des impôts trop lourds, luttait difficilement contre son sol ingrat, la misère était profonde. Dans l'*Avis* sur la taille de 1765, Turgot, qui administrait cette pauvre province, écrit : « La misère des métayers est telle que, dans la plupart des domaines, les cultivateurs n'ont pas, toute déduction faite des charges qu'ils supportent, plus de 25 à 30 livres à dépenser par an pour chaque personne (je ne dis en argent, mais en comptant tout ce qu'ils consomment en nature sur ce qu'ils ont récolté). »

En 1770, à la suite d'une mauvaise récolte, « la misère générale fut telle qu'il fallut pourvoir à la nourriture gratuite des habitants ». Le paysan vivait de sarrasin pendant l'été, de châtaignes pendant l'hiver; le peu de froment ou de seigle récolté servait à acquitter les impôts...

L'Association française pour l'avancement des sciences a tenu un congrès à Limoges en 1890; une délégation fut reçue par M. Teisserenc de Bort, sénateur, ancien ministre de l'Agriculture, que nous avons eu le chagrin de perdre récemment. On nous fit visiter plusieurs métairies, elles étaient propres, bien tenues; un magnifique troupeau de ces jolies bêtes limousines, aux cornes fines, à la robe blonde, au mufle noir, était réuni sous les ombrages du parc; les bouviers étaient des gars

solides, bien chaussés, bien vètus, la mine réjouie... En les voyant, les lamentations du bon Turgot nous revenaient à l'esprit. D'où provenait un tel changement? Sans doute, les impôts, mieux répartis, ne sont plus écrasants; mais si l'aisance a remplacé la misère, l'abondance : la famine, c'est surtout parce que, en 1856, le chemin de fer traversant des pays calcaires, prolongé de Châteauroux à Limoges, a jeté à pleins wagons sur les terres de la Haute-Vienne la chaux que fabrique à bas prix le département du Cher.

Transporter à de longues distances, une matière aussi encombrante, sur des charrettes, par de mauvaises routes, est impraticable : il a fallu que les chemins de fer fussent construits pour que la chaux arrivât dans ce pays granitique, où elle faisait cruellement défaut.

Le Limousin est essentiellement un pays d'élevage; le sous-sol imperméable force les eaux à courir à la surface des terres accidentées : on a su tirer parti de cette structure du terrain; presque partout les prairies sont irriguées; elles n'étaient cependant que d'un maigre profit tant que les amendements calcaires ont fait défaut, et il est intéressant d'en chercher la raison.

Il n'est pas de plantes plus sensibles à l'action des engrais azotés que les graminées de la prairie : quand elles reçoivent des nitrates, elles deviennent vigoureuses et les coupes sont copieuses. En général la matière azotée, origine de ces nitrates, entretenue par les débris végétaux qui s'accumulent dans la prairie, par l'activité des microbes fixateurs d'azote, est en quantité suffisante

pour nourrir d'abondantes récoltes. Il arrive souvent cependant qu'elles soient médiocres, et qu'il y ait un profond désaccord entre la richesse du sol et la pauvreté des produits qu'il fournit. Ce désaccord est dû à l'inertie de la matière azotée : les ferments qui doivent la transformer, les ferments nitriques, ne travaillent que dans les milieux très légèrement alcalins ; or l'accumulation des débris végétaux provoque au contraire la formation de substances acides, et la matière azotée s'accumule inutile : elle n'est pas assimilable. Tout change par l'addition de la chaux ; l'acidité du sol est neutralisée, bientôt les ferments nitriques se mettent à l'œuvre, la matière azotée évolue, les récoltes augmentent. Rien n'est plus facile que de montrer dans les laboratoires cette heureuse transformation : une terre acide de prairie régulièrement arrosée qui ne donne pas traces de nitrates, en fournit bientôt après que la chaux répandue s'est carbonatée à l'air.

La chaux, en outre, modifie profondément la flore des prairies granitiques ou schisteuses : à la place des joncs et des carex qui abondent dans les fonds humides, apparaissent les légumineuses. La chaux leur est indispensable, c'est pour elles un aliment nécessaire comme l'acide phosphorique. Or l'arrivée des légumineuses dans les prairies naturelles en accroît sensiblement la valeur, le foin devient plus nutritif et toutes les plantes médiocres qui constituent les prairies acides, dépérissent après le chaulage. Dans le combat pour la vie que livrent sans cesse les espèces des prairies, l'avantage

reste aux bonnes graminées et aux légumineuses; le petit trèfle blanc, la minette, qui ne croissent pas dans les terres privées de chaux, commencent à apparaître, et finalement, en quelques années, de simples pacages deviennent des prairies fauchables.

En Limousin, l'effet fut prodigieux : sur nombre de domaines qui naguère encore nourrissaient à peine le métayer et ne laissaient au propriétaire qu'un revenu insignifiant, il a suffi de chauler et d'ajouter des phosphates pour modifier la culture : les animaux, mieux nourris, ont donné de meilleur fumier; toutes les récoltes s'en sont ressenties : en quelques années, les revenus ont doublé et même parfois quadruplé.

Dans tous les pays granitiques, les amendements calcaires sont recherchés. Dans nos départements de l'Ouest, on emploie, depuis un temps immémorial, des sables coquilliers qui se déposent dans les baies, les anses, principalement à l'embouchure des rivières de la basse Normandie et de la basse Bretagne. Ces sables, désignés sous le nom de tangues, sont obtenus par le raclage des plages ou le dragage régulier des bancs. L'action en a été observée dès le moyen âge : d'anciens cartulaires, des pièces relatives à des concessions de droit de tangage, permettent d'établir qu'au XIIe siècle les populations du Nord-Ouest se servaient de la tangue pour améliorer leurs terres.

Les variétés les plus recherchées sont les plus riches en carbonate de chaux. La tangue renfermant de petites quantités d'azote est parfois employée seule, plus sou-

vent cependant on en fait des composts; on la mélange à du fumier, des balayures, des curures de mares ou de fossés, qu'on stratifie régulièrement.

C'est aussi en mélange avec le fumier que la chaux est employée dans la Sarthe et la Mayenne. On a cru pendant longtemps que cette pratique était condamnable : on pensait que la chaux dégagerait, en pure perte, l'ammoniaque du fumier et qu'on ne répandrait plus après cette addition que du fumier appauvri; mais ces critiques tombent quand on examine de plus près le mode d'opérer des cultivateurs de l'Ouest. Ils creusent un fossé, dans lequel ils déposent de la chaux vive qu'ils couvrent de terre; après quelques jours cette chaux s'est éteinte et réduite en poudre; on incorpore à la terre la farine de chaux ainsi préparée; on apporte alors le fumier le long de la fosse, puis on procède au mélange, on recouvre de terre, et on abandonne pendant quelques mois ce compost de fumier, de chaux et de terre, qui, présentant un volume plus grand que celui de la terre extraite du fossé, dépasse le niveau du champ, d'où le nom de « tombe » sous lequel ce compost est généralement désigné dans le pays.

Les cultivateurs qui ont imaginé ce mode de traitement du fumier ont, sans s'en douter, réuni toutes les conditions favorables à une nitrification active : l'ammoniaque dégagée du fumier par l'action de la chaux est retenue par les propriétés absorbantes de la terre, et bientôt devient la proie des ferments nitriques, qui travaillent bien plus activement dans ce compost

que dans les terres schisteuses de la Mayenne et de la Sarthe, où la chaux fait défaut.

Ce qui s'est passé dans ce même département de la Mayenne justifie un vieux dicton des paysans : « La chaux enrichit le père et ruine les enfants. » Il présente, en effet, un fond de vérité. Dans un sol dépourvu de calcaire, il faut sans cesse le répéter, la nitrification ne s'établit que très imparfaitement : les débris végétaux s'accumulent, les microbes fixateurs d'azote travaillent, et, comme la grande cause de mobilisation d'azote, la nitrification, fait défaut, cet élément augmente peu à peu; il abonde dans les vieilles prairies; on y trouve, au lieu de 1 à 2 grammes d'azote combiné par kilogramme, taux habituel des bonnes terres arables, 5, 8, jusqu'à 10 grammes par kilogramme. Quand on chaule, le ferment nitrique auquel on a créé un milieu favorable commence son œuvre, la culture prospère, mais les nitrates formés surpassent les besoins des récoltes, ils sont entraînés par les eaux souterraines, et la terre s'appauvrit. C'est l'histoire de la Mayenne : il y a quarante ans déjà, les cultivateurs de ce département se plaignaient de l'épuisement de leur sol; un directeur de ferme-école appelé devant une commission au ministère de l'Agriculture, disait en 1856 : « Quand on a employé la chaux sur des terrains acides, humides, chargés de débris végétaux, on en a obtenu des résultats admirables, et on a dit que la chaux était le meilleur des engrais. On s'est livré avec ardeur à la culture du trèfle et notamment de la graine : le trèfle couvrait le

sol pendant dix-huit mois sur trois ans, on vendait la graine. La moitié des fortunes du pays venait de la graine de trèfle : aujourd'hui cette culture est perdue. »

Si nous avons réussi à faire bien saisir le rôle de la chaux, on conçoit qu'elle détermine la transformation de la matière organique inerte, insoluble, du sol, en substances solubles, assimilables, qu'en somme, en chaulant sans mettre d'engrais, on vit sur un capital accumulé pendant des siècles, on en jouit, mais on le dissipe. Il n'en est plus ainsi quand on a fait alterner les chaulages avec de bonnes fumures de fumier de ferme.

La chaux exerce son action utile, non seulement dans les terrains granitiques ou schisteux, qui, provenant de la décomposition de roches dans lesquelles la chaux fait défaut, ne renferment même pas la petite proportion de calcaire nécessaire à l'existence des légumineuses, elle est employée aussi avec un grand avantage sur les terres tourbeuses et sur les terres fortes, très riches en argile. J'en ai eu sous les yeux un exemple frappant. M. Porion, grand industriel du Nord, qui pendant plusieurs années m'avait demandé des conseils, possédait, à la limite du Nord et du Pas-de-Calais, un petit domaine situé sur la commune de Blaringhem ; il était affermé. Un beau jour, le fermier vint trouver son propriétaire, demandant la résiliation du bail : il ne pouvait, disait-il, tirer aucun parti de la terre lourde, tenace, qu'il avait louée, il perdait de l'argent ; en continuant, il marchait à la ruine. M. Po-

rion lui rendit sa liberté, reprit le domaine, et se mit en mesure de l'exploiter lui-même; il procéda à un drainage très soigné, chaula, puis distribua de très copieuses fumures de fumier de ferme. Toutes ces améliorations étaient réalisées quand je commençai à m'occuper de sa culture. Or, cette terre, dont un fermier, trop pauvre pour entreprendre les améliorations foncières, et même trop ignorant pour les demander, ne pouvait tirer aucun parti, a fourni des récoltes de blé qui se sont élevées en 1885 à 43 quintaux métriques de grain à l'hectare, à 45,3 en 1886 et à 36,15 en 1887, c'est-à-dire très supérieures à la moyenne de cette région, qui est cependant celle qui fournit les plus hauts rendements obtenus en France.

Le chaulage des terres fortes est donc souvent extrêmement avantageux. Il n'en est plus de même des terres légères : à Grignon, je cultive un sol qui souffre bien plus de la sécheresse que de l'humidité. C'est pendant les années pluvieuses qu'on y obtient les récoltes les plus élevées. Personne ne marne ni ne chaule dans le pays ; cependant, pour en avoir le cœur net, j'essayai, il y a déjà plusieurs années, de répandre de la chaux sur quelques parcelles du champ d'expériences... l'effet fut déplorable, les récoltes amoindries pendant plusieurs saisons.

A quelles causes attribuer des résultats si différents? comment se fait-il que sur la terre forte de Blaringhem le chaulage ait été merveilleux, détestable sur la terre légère de Grignon? Certainement ce dernier sol est plus

calcaire que celui du Nord, mais les différences dans la teneur en chaux ne sont pas suffisantes pour expliquer ces résultats opposés.

Les effets multiples du chaulage sont bien loin d'être encore complètement élucidés; cependant, en s'appuyant sur une très élégante expérience due à M. Schlœsing, on peut risquer quelques hypothèses. Quand on délaie de la terre argileuse non calcaire dans de l'eau distillée, puis qu'on abandonne au repos l'eau bourbeuse ainsi préparée, elle ne s'éclaircit pas; le sable tombe au fond, mais l'argile reste en suspension pendant plusieurs jours. Il est facile cependant de clarifier l'eau rapidement ; quand on y verse un sel de chaux ou encore du sel marin, l'argile se coagule, s'agglutine, forme des flocons qui bientôt gagnent le fond du vase; il se dépose une couche de boue, et l'eau devient limpide. La portée de cette expérience de laboratoire est considérable ; elle permet non seulement de concevoir comment les eaux calcaires sont limpides, tandis que celles qui coulent dans les terrains pauvres en chaux sont limoneuses, comment les eaux de l'Océan sont claires; elle explique en outre la formation des deltas à l'embouchure de tous les grands fleuves. Au contact des eaux marines, les eaux douces chargées de limons se clarifient, les argiles qu'elles entraînaient se déposent et forment des dépôts de boue au travers desquels les fleuves ont peine à se frayer un passage, ils se divisent, se bifurquent : le Nil, le Gange, le fleuve Rouge du Tonkin, l'Amazone, l'Orénoque, le Rhône,

le Rhin, le Pô, n'arrivent à la mer que par des deltas.

L'expérience de M. Schlœsing peut-elle en outre expliquer les avantages qu'on trouve à chauler une terre forte, les inconvénients qu'entraîne la même opération pratiquée sur les terres légères? C'est ce qu'il nous reste à discuter. Une terre forte, riche en argile, est peu perméable à l'eau et à l'air. Si elle n'est pas drainée, il faut la cultiver en billon pour faciliter l'écoulement de l'eau, l'ennemi est l'excès d'humidité retenue par l'argile, qui forme comme une éponge toute gonflée de liquide; la chaux coagule cette argile: elle comprime l'éponge et laisse l'eau s'échapper; la terre devient plus filtrante, moins collante, plus abordable: le chaulage des terres fortes est avantageux. Dans une terre légère, le sable domine; reçoit-elle une forte pluie, celle-ci s'infiltre, disparaît; deux heures plus tard la terre est abordable, l'ennemi est la sécheresse. Si la chaux coagule l'argile peu abondante que cette terre renferme, elle diminue encore sa faculté de retenir l'eau, les défauts de la terre légère s'exagèrent; l'opération est déplorable.

Toute la chaux employée aux usages agricoles n'est pas acquise pour être répandue sur les terres: dans le nord-est de la France, une fraction importante de la chaux utilisée provient des sucreries; elle est contenue dans le produit désigné sous le nom d'*écumes de défécation*. On sait que, pour purifier les jus sucrés qui proviennent du traitement des betteraves, on les mélange à de la chaux éteinte, puis délayée dans l'eau, à du

lait de chaux; quand ce mélange a été effectué, on précipite la chaux à l'aide d'un courant d'acide carbonique provenant, comme la chaux elle-même, de la calcination du calcaire, de façon qu'on reforme, dans les cuves de jus sucré, le carbonate de chaux qu'on a décomposé dans les grands fours coulants qu'on voit dans toutes les sucreries. Le précipité de carbonate de chaux qui se produit dans le liquide, entraîne avec lui la plupart des impuretés que renfermaient les jus; aussi, après cette purification sont-ils conduits aux appareils d'évaporation. Quant à la boue calcaire qui tombe au fond des cuves, on la soumet dans des appareils spéciaux dits *filtres-presses* à une pression suffisante pour en extraire tout le jus sucré qu'elle renferme. Les résidus pressés forment les *écumes de défécation;* elles renferment, outre une grande quantité de chaux, les matières organiques azotées solubles extraites de la betterave en même temps que le sucre et qui n'ont pas été décomposées pendant le traitement; elles augmentent quelque peu la valeur comme engrais des écumes de défécation, que les cultivateurs des terres fortes emploient avec d'autant plus d'avantage que le prix en est très bas.

Il n'en est pas ainsi de la chaux vive : aussi les chaulages à très forte dose, s'élevant à 3 ou 400 hectolitres, comme on les pratique quelquefois en Angleterre, sont-ils souvent onéreux, ou au moins représentent-ils une très grosse avance. Un hectolitre de chaux vaut au four environ 1 fr. 50; mais, conduit aux champs, incorporé au sol, sa valeur a au moins doublé : un chaulage à

100 hectolitres à l'hectare représenterait donc une avance de 300 francs, qui serait, dans les comptes, répartie sur une dizaine d'années. Les quantités de chaux répandue varient, suivant la nature des terrains, entre des limites très écartées; on est guidé par les résultats obtenus : si, sur une terre qui ne portait, avant le chaulage, aucune légumineuse, on voit apparaître le petit trèfle blanc des prairies, la dose de chaux est suffisante ; si au contraire aucune modification sensible de la flore primitive ne se produit, la quantité de chaux employée est trop faible.

§ II

Plâtre.

Bien que le plâtre soit du sulfate de chaux, et que par conséquent il renferme la même base que la marne ou les calcaires employés à la fabrication de la chaux, son action est très spéciale et tout à fait différente de celle des amendements calcaires. Il n'agit que sur les prairies de légumineuses, sur les prairies artificielles : trèfle, luzerne ou sainfoin.

On n'a commencé à l'employer qu'à la fin du siècle dernier; c'était le moment où Schubart, animé d'un ardent désir de faire progresser l'agriculture, cherchait à développer en Allemagne la culture du trèfle : il multipliait les essais, les recommençait chaque année, et

sans cesse par ses écrits vantait sa plante de prédilection. Ces louanges étaient justifiées : à cette époque, on n'avait guère d'autre engrais que le fumier de ferme, dont la production est étroitement liée aux ressources fourragères; il y a cent ans, aucune industrie agricole ne fournissait de résidus utilisables à l'alimentation du bétail ; on cultivait à peine la betterave ou la pomme de terre : par suite le foin de la prairie et les pailles des céréales étaient seuls distribués aux animaux. Or, la prairie établie en terres sèches ne donne que des produits aléatoires, les graminées qui la forment se défendent mal contre la sécheresse, on l'a bien vu en 1893, et on conçoit quel changement amena l'introduction d'une plante fourragère vivant sur les plateaux comme les céréales et y donnant des récoltes plus abondantes, plus nutritives que celles qu'on obtient des prairies naturelles.

On fut d'abord assez malhabile dans cette nouvelle culture, et les échecs étaient fréquents, quand, en 1765, le pasteur Mayer annonça qu'on doublait la récolte du trèfle en le saupoudrant de plâtre. Cette découverte provoqua un véritable enthousiasme ; ce fut, dit Schwertz, le commencement d'une ère nouvelle pour l'agriculture : à la jachère improductive, longtemps considérée comme une nécessité, on substitua avec un immense avantage la culture du trèfle.

Les expériences se multiplièrent en France, en Angleterre, en Amérique; habituellement elles réussirent. Très vite, on arriva à l'engouement, on s'imagina que

le plâtre était un engrais universel qui allait remplacer tous les autres. Il n'en était rien cependant : les mécomptes furent nombreux, et comme ces résultats contradictoires avaient jeté quelque trouble dans les esprits et qu'après avoir exagéré les effets utiles du plâtre il était à craindre qu'on le négligeât outre mesure, la Société d'agriculture de France jugea utile d'ouvrir une enquête. Une série de questions précises fut adressée aux cultivateurs; des réponses, classées par Bosc, professeur au Muséum d'histoire naturelle, il résulta que le plâtre, très utile sur les prairies artificielles établies sur des terres riches en humus, n'exerçait pas d'action sur les légumineuses semées en terres stériles, non plus que sur les céréales. Ces conclusions ont été confirmées par toutes les observations ultérieures; mais, quand il fallut essayer de comprendre le mode d'action du plâtre, on se trouva fort empêché.

La question est délicate en effet, et a exercé depuis longtemps la sagacité des agronomes. Rappelons d'abord que le mode d'alimentation des légumineuses, qui bénéficient de l'emploi du plâtre, est très particulier : elles ne prospèrent que dans les sols riches en humus, elles ne fournissent d'abondantes récoltes qu'autant que le sol présentera à leurs racines des matières humiques dissoutes; or, dans la terre, les matières humiques sont souvent combinées à la chaux, qui les rend insolubles; dans les laboratoires, quand nous voulons les extraire, il faut commencer par détruire cette combinaison à l'aide de l'acide chlorhy-

drique étendu : il dissout la chaux, et quand, après avoir expulsé le chlorure de calcium, formé par des lavages, on ajoute à la terre ainsi traitée du carbonate de potasse, on obtient une liqueur très colorée, très chargée de matières humiques.

Visiblement le plâtre, le sulfate de chaux, n'est pas par lui-même un dissolvant des matières humiques ; il ne peut agir qu'en provoquant des réactions secondaires, et j'ai reconnu, en effet, il y a longtemps déjà, qu'une terre plâtrée abandonne à l'eau une quantité de potasse bien plus considérable que celle qu'on peut extraire d'une même terre sans addition. Boussingault avait trouvé, en outre, que les cendres d'un trèfle plâtré sont plus riches en potasse, mais non en acide sulfurique, que celles d'un autre trèfle venu sur une terre semblable privée de cet amendement. C'est, en effet, en agissant sur la potasse contenue dans le sol, en déterminant à l'aide de cette potasse la dissolution des matières humiques, que le plâtre est favorable.

Une expérience très simple permet de concevoir comment le plâtre mobilise la potasse du sol : on agite avec de la terre une dissolution de carbonate de potasse étendu dont la teneur en alcali a été rigoureusement déterminée ; si, après cette agitation, on filtre et qu'on détermine le titre de la dissolution alcaline, on voit qu'il a singulièrement baissé, souvent des quatre cinquièmes. La terre absorbe, retient, insolubilise la potasse ; c'est une action analogue à celle du noir animal retenant les matières colorantes.

Si, au lieu d'agiter avec de la terre du carbonate de potasse, on emploie une dissolution de sulfate de potasse, on trouve que l'absorption est infiniment moindre. Combinée à l'acide sulfurique, la potasse circule dans le sol, tandis qu'elle est arrêtée quand elle est unie à l'acide carbonique ; et tout de suite nous comprenons que le plâtre, le sulfate de chaux, en agissant sur le carbonate de potasse, l'amène à l'état de sulfate par échange des bases et des acides. Ajouter à un sol du plâtre, c'est donc y provoquer la formation du sulfate de potasse. Or, si on laisse en contact pendant quelques instants la combinaison des matières humiques et de la chaux, qui, nous l'avons dit, est très peu soluble, avec du sulfate de potasse, on voit la liqueur se colorer; la matière humique se dissout, le sulfate de potasse a formé, au contact du carbonate de chaux qui englobait la matière humique, du carbonate de potasse qui la dissout; de même, si on fait bouillir de la terre riche en matières organiques avec du sulfate de potasse, on voit la liqueur se colorer fortement, la matière humique est mobilisée.

En détruisant l'adhérence de la potasse au sol, en lui rendant sa faculté de dissoudre les matières humiques, aliment de préférence des légumineuses, le plâtre exerce donc une action favorable sur les terres riches en humus. On conçoit, en outre, qu'on puisse substituer au plâtre le sulfate de potasse quand son prix n'est pas trop élevé, comme l'ont fait sirs Lawes et Gilbert dans une expérience restée célèbre. Et on conçoit enfin que

le plâtre soit sans effet sur une terre pauvre en humus, ce qu'avaient observé les correspondants de la Société d'agriculture dont les dépositions ont été résumées par Bosc.

On s'accorde à reconnaître que 300 ou 400 kilos de plâtre à l'hectare distribués au premier printemps sur les jeunes trèfles, luzernes ou sainfoins sont suffisants; c'est là une faible dépense, le plâtre cru ne valant guère que 20 francs la tonne. Aux environs de Paris, son effet est peu sensible; il n'y a pas lieu de s'en étonner: le plâtre étant naturellement abondant dans le bassin parisien, une nouvelle addition n'est pas utile.

La culture n'a fait au XVIII[e] siècle aucun progrès comparable à l'introduction dans les assolements des prairies artificielles; elles ne s'étendirent que lentement: pendant qu'il parcourt la France, quelques années avant la Révolution, A. Young note au passage les terres, encore peu nombreuses, sur lesquelles croît la luzerne; et bien qu'il ignorât les raisons qui rendent cette culture si précieuse, les résultats qu'il en avait obtenus le poussaient à la recommander et à juger de l'état d'avancement de l'agriculture dans une région par la place qu'on y accordait au trèfle ou à la luzerne. Nous pouvons aujourd'hui, en connaissance de cause, admirer sa sagacité; la découverte de MM. Hellriegel et Wilfarth, en nous apprenant que les bactéries qui peuplent les nodosités des racines des légumineuses fixent l'azote de l'air, nous explique comment les plantes de cette famille enrichissent les sols qui les ont portées; elle

nous fait comprendre enfin combien est précieux le plâtre, l'amendement qui favorise le développement de ces plantes si justement nommées améliorantes.

§ III

Phosphates.

Si le progrès agricole le plus marqué du XVIIIe siècle est l'introduction dans l'assolement des légumineuses, soutenues par l'addition du plâtre, il semble que l'acquisition la plus heureuse que nous ayons faite, pendant le siècle qui finit, soit l'emploi régulier des engrais phosphatés.

Il y a cent ans, nos connaissances relatives à la vie végétale étaient singulièrement bornées, et elles ne pouvaient s'étendre tant que la chimie n'avait pas trouvé les procédés d'analyse qui permettent d'établir la composition des végétaux. Aussitôt que ces méthodes commencèrent à se préciser, un physiologiste genevois, Th. de Saussure, dont la réputation est bien loin d'égaler le mérite, aborda l'analyse des cendres des plantes, et ce mode de recherche se trouva tellement fécond, qu'en 1804 de Saussure put écrire dans ses *Recherches chimiques sur la végétation* : « J'ai trouvé le phosphate de chaux dans les cendres de toutes les plantes que j'ai examinées, et il n'y a aucune raison de supposer qu'elles peuvent exister sans lui. »

Il semble que l'emploi régulier des phosphates dût découler de cette grande découverte... Point : la parole de Th. de Saussure sonne dans le vide, personne n'y prend garde, et ce n'est que dix-huit ou vingt ans plus tard, par simple empirisme, en répandant sur le sol du noir animal, que furent constatés les merveilleux effets des phosphates.

Sous la pression du blocus continental, qui avait déterminé en Europe une pénurie singulièrement gênante des denrées coloniales, on commença à extraire des betteraves le sucre qu'elles renferment : il est identique à celui que jusque-là fournissaient les cannes des régions tropicales. Le jus qui s'écoule des betteraves écrasées est très coloré ; pour le clarifier, on mit à profit les propriétés décolorantes du noir animal, de la substance obtenue par la calcination en vase clos, à l'abri de l'air, des os riches en phosphate de chaux. Après avoir servi pendant quelque temps, le noir animal perd ses vertus décolorantes ; il s'accumulait inutile et gênant à la porte des usines ; pour s'en débarrasser, on le répandit sur les champs voisins. La fortune voulut que ces terres fussent pauvres en acide phosphorique, la récolte augmenta : le fait fut connu, les essais se multiplièrent, et quand, après la chute de l'Empire, les sucres bruts des colonies arrivèrent de nouveau dans nos ports de l'Océan, que des raffineries s'y établirent et usèrent, comme les fabriques de sucres indigènes, du noir animal, celui-ci y devint abondant. Répandu sur les sols schisteux, granitiques de la Bre-

tagne, le noir provenant des raffineries de Nantes présenta une telle efficacité que bientôt les résidus des usines nantaises ne furent plus suffisants pour satisfaire aux demandes des cultivateurs bretons et que de toutes les parties du continent le noir animal afflua en Bretagne.

Quand on calcine les os pour en faire du noir animal, on détruit toute leur matière organique, mais le phosphate de chaux, qu'ils renferment en grande quantité, persiste. et il semble qu'en rapprochant leur efficacité, comme engrais, des analyses de Th. de Saussure, on aurait dû rapidement comprendre que la partie active des os est le phosphate de chaux. Il n'en fut pas ainsi ; pendant longtemps les os furent employés comme engrais sans qu'on sût à quelle cause rapporter leur heureuse influence, et c'est seulement en 1843 que le duc de Bedford découvrit qu'elle était due au phosphate de chaux.

A la même époque, Liebig avait reconnu qu'en traitant les os par l'acide sulfurique on rend leur action plus rapide ; ce fut là l'origine d'une industrie qui a pris un prodigieux développement : la fabrication des superphosphates [1].

1. On désigne sous ce nom le produit obtenu en traitant les os ou les phosphates minéraux par l'acide sulfurique. Cet acide s'empare partiellement de la chaux des phosphates, et met en liberté de l'acide phosphorique. Quand les superphosphates, dont la réaction est très acide, sont répandus dans le sol, l'acide phosphorique libre entre rapidement en combinaison, il s'unit à la chaux des calcaires, à l'oxyde de fer, à l'alumine des argiles, il cesse d'être soluble dans l'eau et, au premier abord, on peut

Aussitôt qu'il fut établi que les phosphates sont des engrais efficaces, se présenta une question qu'il fallait tout d'abord résoudre : Où trouver ces phosphates ? Pendant longtemps on les crut très rares. En 1856, le célèbre géologue Élie de Beaumont, à ce moment secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, publia *sur les gisements géologiques du phosphore* un mémoire qui eut un juste retentissement. Élie de Beaumont constatait avec effroi que le phosphore paraît peu répandu à la surface du globe : on connaissait en Estramadure un filon d'apatite, phosphate de chaux dur et cristallin ; on avait trouvé en Angleterre et dans le Pas-de-Calais en France quelques petits cailloux noirâtres riches en phosphate ; mais tout cela paraissait de peu d'importance, et on se demandait s'il ne faudrait pas faire rentrer dans la circulation les phosphates des os humains séquestrés dans les catacombes et même dans les cimetières, quand les recherches de nouveaux gisements furent couronnées d'un succès éclatant. En France, cette découverte est liée au nom d'un industriel, chercheur infatigable, de Molon, qui le premier signala des quantités exploitables de phosphate de chaux en nodules sur le versant occidental de l'Argonne, là où le terrain crétacé repose sur le jurassique.

être étonné qu'il y ait eu avantage à lui donner une solubilité aussi éphémère, si on ne reconnaissait que les phosphates, insolubles il est vrai, reformés dans le sol, sont gélatineux, floconneux, infiniment plus attaquables par les sucs acides des racines que les pierres dures, compactes, ou les os à tissu serré employés à la fabrication.

C'est aussi à la limite de ces deux terrains que les nodules sont exploités dans le Boulonnais, dans la Côte-d'Or, dans l'Indre, etc. Dès 1856, l'extraction commença, et quand on eut appris à reconnaître ces cailloux noirâtres arrondis, appelés d'abord « coprolithes », qui, au premier aspect, attirent peu l'attention, on les trouva très répandus, non seulement en France et en Angleterre, mais encore en Russie, disséminés sur d'immenses étendues ; plus récemment enfin, on en a découvert en Algérie et dans le sud de la Tunisie des gisements extrêmement étendus présentant une richesse suffisante pour que leur transformation en superphosphate soit avantageuse, et il est vraisemblable que d'ici à peu d'années, les exploitations voisines de Tebessa, qui fournissent déjà 100000 tonnes par an, prendront une très grande activité. Il est vraisemblable également que le gisement de Gafsa, au sud de la Tunisie, concédé à une compagnie française, sera prochainement mis en exploitation. Il est nécessaire toutefois de construire une voie ferrée qui mette en relation le gisement avec le port de Sfax.

Les phosphates minéraux ont des caractères si mal définis, ils ressemblent tellement aux pierres, aux sables les plus vulgaires, qu'il n'est pas étonnant que pendant des siècles ils aient passé inaperçus : tel est le cas non seulement pour les phosphates algériens ou tunisiens, situés dans des contrées dont l'exploration commence à peine, mais ce qui est plus singulier, il en a été de même dans nos départements les plus peuplés : — les sables

phosphatés de la Somme et du Pas-de-Calais, largement exploités aujourd'hui, ont été employés pendant longtemps à faire du ciment ou à couvrir les routes. Les phosphates des terrains primitifs, les apatites, les phosphorites, sont plus faciles à reconnaître : on en a découvert des gisements dans le Gard, dans le Tarn et le Tarn-et-Garonne ; on les rencontre en Espagne dans la vallée de la Guadiana, en Norvège, au Canada ; enfin un immense gisement de phosphates, de formes diverses, très riches, a été mis récemment en exploitation au sud des États-Unis, dans la presqu'île de la Floride. Actuellement, les quantités extraites dépassent la consommation et les prix ont considérablement baissé.

A ces phosphates naturels s'ajoutent depuis quelques années les *scories de déphosphoration*. Certains minerais de fer, communs dans notre pays, en Allemagne, en Angleterre, renferment du phosphore. Les fontes qui proviennent de la fusion de ces minerais se prêtent mal à la fabrication de l'acier : pour les employer, on est obligé de les priver de phosphore en les fondant en présence de la chaux. Les scories qui se forment pendant cette fusion, riches à la fois en chaux et en acide phosphorique, conviennent très bien aux terrains pauvres en chaux ; le prix des scories, même réduites en poudre très fine, est peu élevé, leur consommation s'accroît chaque année.

Nous pouvons donc puiser au milieu d'un immense approvisionnement : le monde ne périra pas faute de phosphore. Mais comment choisir parmi toutes ces

variétés d'engrais que nous offre le commerce? Et d'abord, les phosphates sont-ils d'un emploi universel? faut-il en répandre sur toutes les terres? et s'il faut en répandre, qu'acheter? Des phosphates fossiles ou des os? des scories de déphosphoration ou les produits traités par l'acide sulfurique désignés sous le nom de superphosphates?

Visiblement, nos chances d'augmenter nos récoltes par l'apport des engrais phosphatés seront d'autant plus grandes que nos sols renfermeront moins d'acide phosphorique, et déjà la constitution géologique du domaine nous servira de guide. Les terres provenant de la désagrégation des roches primitives, dans lesquelles le phosphore n'existe pas, seront en général très pauvres; tout à l'opposé se placeront les terres d'origine volcanique, habituellement très riches; mais entre ces deux extrêmes se trouvent des sols pour lesquels l'analyse sera notre seul guide.

Les chimistes agronomes ont mis depuis vingt ans une sorte d'acharnement à perfectionner les méthodes de recherches et de dosage de l'acide phosphorique : elles sont excellentes aujourd'hui [1] et peuvent être employées avec sécurité. Un premier point ressort de ces dosages : on trouve l'acide phosphorique dans presque

1. Le progrès le plus saillant réalisé dans cette voie est dû à l'emploi du nitromolybdate d'ammoniaque qui permet de précipiter l'acide phosphorique dissous dans l'acide azotique, dans une liqueur très chargée de ce même acide azotique qui maintient en dissolution tous les éléments attaquables par les acides : chaux, oxyde de fer, alumine, magnésie, potasse, silice, etc.

tous les sols cultivés, mais parfois en proportions très minimes; quand l'analyse décèle moins d'un millième, les phosphates doivent être essayés, la chance de réussite est très grande; elle est certaine si la proportion d'acide phosphorique dosé tombe à un demi-millième.

Dans la plupart des terres de la Bretagne on ne trouve même pas ce demi-millième, de sorte que les phosphates y exercent une action dont on a quelque peine à se faire une idée quand on ne l'a pas vue. Le sarrasin, qui dans le centre du pays est encore la culture la plus répandue, semé dans un sol sans phosphate n'a pas dix centimètres de haut, souvent la récolte avorte, elle ne porte pas de graines : elle est luxuriante à côté, là où les phosphates ont été répandus.

C'est en Bretagne que pendant trente ans a été employé tout le noir animal qu'amenaient à Nantes des centaines de bâtiments; c'est la Bretagne qui est aujourd'hui le centre de consommation le plus actif des phosphates pulvérisés provenant de nos départements de l'Est. Les phosphates ont fait mentir le mélancolique proverbe des cultivateurs bretons, qui disaient de leur terre stérile : « Lande tu as été, lande tu es, lande tu seras! » La lande disparaît peu à peu; grâce aux phosphates, la culture du blé y est devenue possible, les ensemencements ont changé de nature : de 1862 à 1882, le froment a passé de 79 623 hectares à 99 195 dans les Côtes-du-Nord, de 38 923 à 47 992 dans le Finistère, de 115 589 à 139 811 dans l'Ille-et-Vilaine, de 124 633 à 152 617 dans la Loire-Inférieure.

Dans les sables de la Sologne, pauvres en acides phosphorique, les engrais phosphatés exercent également une action marquée. Si la Haute-Vienne est aujourd'hui prospère, c'est non seulement à la chaux qu'elle le doit, mais aussi à l'acide phosphorique. Les phosphates répandus à la fin de l'été sur les prairies les métamorphosent; l'année suivante la flore a changé, et les légumineuses, déjà favorisées par les chaulages, prennent possession de terrains où elles étaient inconnues naguère.

L'expérience enseigne que sur les terres récemment défrichées, que sur les landes mises pour la première fois en culture, la poudre des nodules réussit admirablement... Dans une terre de défrichement les débris organiques abondent : quand cette terre est aérée, que tous ces résidus des végétations antérieures, jusque-là ensevelis, enterrés, arrivent au jour, ils sont l'objet d'une combustion énergique; le sol se charge d'acide carbonique, on y constate même de petites quantités d'acides plus énergiques, notamment d'acide acétique. Or ces acides attaquent, dissolvent, rendent assimilable la poudre des nodules. Aussi, quand pour donner à ces sols de landes tous les éléments minéraux qui leur manquent, on est conduit à les chauler, il faut prendre garde à ne pas donner la même année les phosphates et la chaux : en saturant les acides du sol, cette base empêcherait la dissolution, par suite l'assimilation des phosphates. Les cultivateurs bretons ont même remarqué qu'un chaulage succédant brusquement à l'épan-

dage des phosphates diminuait leur effet : « la chaux brûle le noir, » disaient-ils au moment où le noir animal était le seul engrais phosphaté employé.

Si le noir animal, les os, la poudre de nodules, ont été d'abord répandus avec grand avantage sur les terres granitiques ou schisteuses, sur les sables où l'acide phosphorique fait défaut, l'emploi des phosphates n'est pas limité à ces terres autrefois abandonnées, et on conçoit sans peine que les contrées qui depuis un temps immémorial sont en culture aient perdu peu à peu le stock d'acide phosphorique qui dès l'origine les avait rendues fertiles. L'épuisement est très lent, car l'acide phosphorique n'est pas entraîné par les eaux de drainage : il n'est exporté du domaine que par les récoltes. Mais une bonne terre de Beauce ou de Brie qui depuis deux mille ans produit du froment exporte 900 grammes d'acide phosphorique par chaque quintal de blé qui sort du domaine : c'est cet acide phosphorique qui a formé les os des générations qui se sont succédé à Paris; ces os tapissent aujourd'hui les longues galeries des catacombes, et on conçoit, sans qu'il soit nécessaire d'insister, que ce transport constant des phosphates, des champs cultivés aux ossuaires des grandes villes, ait déterminé un appauvrissement qui se manifeste par la diminution des récoltes.

J'ai rappelé plus haut la transformation qu'avait subie le domaine de Blaringhem entre les mains de mon collaborateur feu M. Porion; j'ai rappelé qu'une terre forte, compacte, assouplie par la chaux, assainie par le

drainage, avait fini par produire d'admirables récoltes de froment... On ne les obtenait qu'à la condition d'employer des engrais phosphatés; le sol ne contenait, en effet, par kilogramme, que $0^{gr},7$ d'acide phosphorique, ce qui est insuffisant.

Ce n'est plus cependant la poudre de nodules qu'il fallait employer sur ces terres en culture depuis un temps immémorial, elle n'exerçait pas d'action sensible; il fallait répandre les phosphates traités par l'acide sulfurique, les superphosphates. C'est là l'engrais phosphaté qui convient aux vieilles terres, cultivées depuis longtemps. Son efficacité est telle, particulièrement pour les cultures de racines, que son emploi s'accroît constamment. En Angleterre, le fameux assolement quadriennal du Norfolk, qui a marqué le grand progrès accompli à la fin du XVIII[e] siècle, s'ouvre par les turneps, les navets, auxquels on ne manque jamais de distribuer des superphosphates; on ne les a remplacés que récemment sur les terres pauvres en calcaire par la poudre des scories de déphosphoration.

En France, la riche région qui s'étend au nord-est de Paris doit sa prospérité à la culture de la betterave à sucre; l'épandage des superphosphates y est la règle. Il n'est pas cependant toujours utile. Sur nos terres de Grignon, les superphosphates n'exercent aucune action; il en est de même dans la Limagne d'Auvergne. J'en ai cherché la raison : quand on incorpore au sol du superphosphate, on introduit de l'acide phosphorique libre, soluble dans l'eau, mais très vite cet acide est saturé

par les bases du sol, par la chaux des calcaires, l'oxyde de fer ou l'alumine des argiles : on reforme ainsi, je l'ai déjà indiqué plus haut, un phosphate insoluble dans l'eau, il est vrai, mais floconneux, gélatineux, très attaquable aux acides végétaux, une matière ouverte, comme disent les Allemands.

Il faut que cette saturation ait lieu ; si elle ne se produisait pas, l'influence des superphosphates serait déplorable : les tissus délicats des jeunes racines seraient rongés, corrodés, détruits par l'acide phosphorique libre. Sur les sols pauvres en chaux de la Bretagne, les superphosphates sont proscrits : leur influence est néfaste.

Quand nous avons incorporé à un sol légèrement calcaire un superphosphate, nous y avons formé un phosphate attaquable par les sucs acides des racines, et si la terre ne renferme pas naturellement des phosphates semblables, l'effet est admirable; il est nul si la terre contient déjà un phosphate assimilable. Pour prévoir si les superphosphates augmenteront les récoltes ou seront répandus en pure perte, il fallait donc non seulement connaître la quantité d'acide phosphorique totale que le sol renferme, mais encore distinguer celui qui est actuellement assimilable de celui qui résiste à l'action dissolvante des racines. J'y ai employé un acide médiocrement énergique, l'acide acétique, et j'ai reconnu que lorsqu'une terre renferme par kilogramme : 1 gramme d'acide phosphorique total et 0gr,2 d'acide phosphorique soluble dans l'acide acétique, les superphosphates sont sans

action : c'est le cas de nos terres de Grignon, de celles de la Limagne et aussi d'une terre admirablement fertile, qui, depuis l'antiquité la plus reculée, est célèbre par sa fécondité : le limon du Nil[1].

Il est bien à remarquer, au reste, que les diverses substances qui existent naturellement dans le sol ou qu'on y ajoute, réagissent constamment les unes sur les autres, et que ces réactions conduisent parfois à des résultats très inattendus.

J'ai laissé sans engrais, depuis 1875, plusieurs parcelles de mon champ d'expériences de Grignon : naturellement, les récoltes y sont devenues très faibles. Frappé, il y a quelques années déjà, du maigre développement du trèfle que j'y avais semé, je me demandai si la diminution de l'humus, que j'avais constatée par l'analyse, était la seule cause de l'amoindrissement des récoltes et si la terre n'était pas épuisée d'acide phosphorique. Je ne le pensais pas, car l'acide phosphorique, n'étant pas entraîné par les eaux de drainage, n'est enlevé que par les récoltes; je savais ce qu'elles avaient emprunté au sol de cette parcelle, et j'étais assuré que le stock d'acide phosphorique restant était considérable. Cependant je voulus en avoir le cœur net, et j'eus recours à l'*ultima ratio* dans nos sciences d'observation,

1. Tout récemment, on a proposé de substituer, dans cette recherche, à l'acide acétique que j'avais employé, l'acide citrique que sécrètent, dit-on, les racines des végétaux; l'expérience a montré un accord remarquable entre les prévisions déduites de l'analyse du sol par cette méthode, et les résultats obtenus de l'emploi des superphosphates. *Annales agronomiques*, tome XX, p. 291, juillet 1894.

à l'expérience : la moitié de la parcelle reçut du superphosphate, l'autre resta sans addition : l'effet sur le trèfle fut nul, et je ne pensais plus guère à cet essai, quand, l'année suivante, le blé qui succéda au trèfle prit sur la partie phosphatée un développement extraordinaire : il était plus haut, plus vert, plus dru que son voisin non phosphaté; à la moisson, on trouva que la parcelle qui avait reçu le superphosphate donna la valeur de 24 quintaux métriques de grains à l'hectare, la partie non phosphatée, 8. Il y avait là de quoi surprendre, puisque, je le répète, des essais très nombreux avaient montré que sur les terres de Grignon les phosphates n'exerçaient aucune influence. L'analyse rendit compte de cette anomalie : l'acide phosphorique total n'était guère moindre dans le sol de ces parcelles que dans celui des autres où les superphosphates restaient sans action, mais cet acide phosphorique n'était plus assimilable, et nous trouvons là un nouvel effet très intéressant des fumures au fumier de ferme.

Non seulement il apporte son appoint d'acide phosphorique qui n'est pas à dédaigner, mais en outre, par son alcalinité, par son carbonate de potasse qui agit sur les phosphates du sol, le fumier maintient à l'état assimilable l'acide phosphorique; aussi, voit-on souvent que les superphosphates qui exercent une influence manifeste quand on cultive exclusivement avec des produits chimiques, n'ont plus guère d'effets quand on distribue régulièrement du fumier.

Ces transformations de l'acide phosphorique dans les

sols pauvres en calcaire sont heureusement combattues par les chaulages. Un inspecteur général d'agriculture, qui a laissé des travaux intéressants sur les prairies, M. Boitel, employait avec avantage des phosphates dans un domaine du Perche, mais bientôt l'effet de ces engrais s'affaiblissait, et il fallait répéter les épandages bien plus souvent que ne semblaient l'indiquer les exigences des récoltes; on reconnut à l'analyse que l'acide phosphorique introduit passait rapidement à l'état non assimilable; un chaulage le ramena à sa forme utilisable.

En résumé, nos connaissances sur l'emploi agricole des phosphates sont aujourd'hui étendues; nous savons par l'analyse indiquer sur quelles terres ces engrais doivent être répandus; nous savons dire en outre quelle nature de phosphate il convient d'employer : aux défrichements nous appliquons la poudre de nodules, aux terrains pauvres en calcaire les scories de déphosphoration, aux vieilles terres les superphosphates, et il ne faudrait pas croire que l'application de ces engrais n'est qu'accidentelle et ne représente qu'un petit mouvement d'affaires, il est énorme au contraire; on en jugera par les nombres suivants :

En 1893, on a extrait des gisements français près de 900 000 tonnes de phosphates, et 983 000 de ceux des États-Unis; à ces gros producteurs se joindront prochainement l'Algérie et la Tunisie.

A ces phosphates directement extraits des gisements s'ajoutent les scories de déphosphoration; leur pro-

duction n'est pas tout à fait d'un million de tonnes, fournies pour la plus grande part par l'Allemagne, l'Autriche et le Luxembourg, et pour une fraction, importante encore, mais moindre, par l'Angleterre; la France ne vient qu'ensuite avec une production qui oscille entre 80 000 et 100 000 tonnes.

La fabrication des superphosphates dépasse 4 millions de tonnes; l'Allemagne, l'Angleterre et la France en produisent les trois quarts et consomment pour cette production environ 500 000 tonnes d'acide sulfurique. On estime qu'en France on répand chaque année 150 000 tonnes de phosphates minéraux simplement réduits en poudre, 70 000 tonnes de scories de déphosphoration et 1 500 000 de superphosphates. Les grandes usines de Saint-Gobain qui fabriquaient en 1889 : 100 000 tonnes de superphosphates en ont livré en 1893 : 200 000; la consommation s'accroît de 25 000 tonnes chaque année. En 1894, la production des superphosphates en France a atteint 700 000 tonnes C'est une richesse acquise; l'acide phosphorique introduit dans le sol y persiste, les avances qui sont consenties ne sont jamais perdues, de telle sorte qu'il y a toujours avantage à tenter l'emploi des engrais phosphatés; si dans certains cas l'action est nulle, dans un très grand nombre leur acquisition est absolument avantageuse [1].

1. Dans le numéro de l'*Engrais* du 21 juin 1895, M. Maizières estime la production totale des superphosphates dans le monde à 4 090 000 tonnes.

§ IV

Engrais de potasse.

Si le lecteur veut bien se reporter au début du chapitre précédent il verra que l'expérience enseigne que la potasse n'est pas moins nécessaire à l'alimentation végétale que l'acide phosphorique, et que des plantes semées dans un sol où la potasse ferait absolument défaut y languiraient quelque temps, mais finiraient par périr avant d'avoir mûri leurs graines; si on se rappelle d'autre part que la plus grande partie de la potasse utilisée par l'industrie provient des terres cultivées, puisqu'elle a été longtemps exclusivement extraite des cendres, et qu'aujourd'hui même les salins de betteraves fournissent encore une fraction considérable de la potasse employée dans les arts, on serait conduit à penser que les engrais de potasse, ayant pour but de restituer au sol un élément qui lui est sans cesse ravi, doivent avoir la plus haute efficacité.

On le croyait, et le célèbre baron de Liebig, dont les écrits véhéments ont eu tant de retentissement il y a cinquante ans, avait puissamment établi cette croyance, quand la découverte d'un important gisement de sel gemme portant dans ses couches supérieures un énorme approvisionnement de sels de potasse, permit de soumettre cette croyance au critérium de l'expérience.

Jusque-là les sels de potasse étaient rares, coûteux,

leur prix les écartait des usages agricoles; tout à coup ils furent offerts à des prix abordables, et partout on les mit en expériences; moi-même, il y a trente ans, je disposai un grand nombre d'essais, et ce fut avec une stupéfaction profonde que j'aboutis à l'échec le plus complet. Bien d'autres essayèrent comme moi, et ne réussirent pas mieux; si dans quelques cas on enregistra des succès, dans bien d'autres on reconnut que les sels de potasse n'augmentaient pas les récoltes, et ces échecs portèrent un coup sensible à une théorie encore prônée dans les livres, dans les cours, mais abandonnée par tous les cultivateurs avisés; cette théorie, imaginée par Liebig, s'appelle la théorie de la restitution.

L'idée est simple : c'est la composition de la plante qui règle la nature des engrais à employer; vous avez conduit à la sucrerie voisine une bonne récolte de 40 tonnes de betteraves à l'hectare; dans ces 40 tonnes il existe 64 kilos d'azote, 44 d'acide phosphorique et 160 kilos de potasse; il faut les restituer au sol qui les a fournis. Si vous y manquez, si vous continuez à pratiquer la *culture spoliatrice*, la *culture vampire des siècles d'ignorance*, votre sol déjà affaibli ne portera plus que des récoltes chétives, votre ruine est prochaine! La véhémence de Liebig en avait imposé, et quand, en 1865, les engrais de potasse furent offerts à des prix abordables, on se hâta d'autant plus de les employer qu'on commençait à reconnaître l'efficacité des engrais minéraux et notamment des phosphates; habituellement

cette addition des sels de potasse ne produisit aucun effet, et il est facile d'en saisir la raison.

Quand, à l'aide d'agents puissants comme les acides fluorhydrique et sulfurique, on réussit à dissoudre complètement quelques grammes de terre, et qu'à la suite de séparations laborieuses, on isole et on pèse la potasse qu'ils renferment, puis que par le calcul on rapporte à l'hectare, on arrive à des chiffres formidables; les agronomes allemands ont trouvé de 36 à 40 tonnes de potasse à l'hectare, M. Berthelot en a dosé 35 à Meudon, j'en ai trouvé 32 à Grignon; sans doute cette masse énorme d'alcali n'est pas engagée dans des combinaisons solubles, mais peu à peu les agents atmosphériques attaquent ces puissantes réserves, qui restent dans les argiles, que l'eau pure est impuissante à entraîner, mais que les sucs acides des racines dissolvent et s'approprient. Quand à des terres semblables, on ajoute des engrais de potasse, on n'en tire aucun bénéfice, les récoltes n'augmentent pas.

Dira-t-on que peu importe et qu'il faut savoir s'imposer des sacrifices actuels pour se préserver des maux futurs; nous répondrons que c'est prévoir le mal de bien loin, que nous voulons jouir de notre bien, qu'il n'y a aucune raison d'interdire à un cultivateur d'exporter la potasse de son champ, quand, à côté de lui, le mineur, à grands renforts de machine, extrait de la houille qu'il serait bien empêché d'avoir à restituer.

En réalité, la théorie de la restitution est une théorie de cabinet, à laquelle aucun praticien ne s'est jamais

soumis ; elle s'appuie sur une idée fausse : ce n'est pas la composition de la plante qui règle la nature et le poids des engrais à fournir, c'est la composition du sol ; l'engrais est essentiellemeut une matière complémentaire, il doit subvenir aux défaillances de la terre. Si l'acide phosphorique fait défaut, il faut se hâter d'en ajouter, et le cultivateur n'y manque pas, car tout de suite sa récolte augmente, il est récompensé, son gain s'accroît ; mais s'il ajoute des sels de potasse, il ne reconnaît pas la place où il les a répandus, rien ne la marque, et le plus clair de l'opération c'est l'augmentation de la facture du marchand d'engrais. Il ne recommence pas.

Est-ce à dire que les engrais de potasse soient toujours sans action ? Non pas ; ils agissent, au contraire, et très bien, là où la potasse fait défaut ; dans les terrains calcaires, en Champagne, dans les terrains tourbeux, dans les grès, leur influence est sensible. Elle l'est surtout quand la culture est soutenue par des engrais chimiques, sulfate d'ammoniaque, nitrate de soude et superphosphates, sans fumier de ferme ; c'est qu'en effet, chaque tonne de fumier apporte 5 kilos de potasse qui, venant s'ajouter à ce que le sol fournit par lui-même, suffisent habituellement à satisfaire les exigences des récoltes.

Aussi bien, nous n'avons nulle inquiétude pour l'avenir : si dans plusieurs siècles l'épuisement en potasse des terres arables se faisait sentir, leur prix s'élèverait, et il deviendrait aisé d'en extraire autant qu'il sera nécessaire d'un réservoir inépuisable : l'Océan.

§ V

La fraude dans le commerce des engrais.

Les cultivateurs bretons ont payé cher la gloire d'avoir les premiers en France employé régulièrement les engrais phosphatés; quand il y a soixante ans le commerce du noir animal s'établit à Nantes, l'analyse chimique était encore peu répandue et les fraudeurs s'en donnèrent à cœur joie.

Un professeur de l'École des sciences de Nantes, qui a consacré sa vie à lutter contre eux, Adolphe Bopierre, estime que, de 1840 à 1850, on a mélangé aux 1 800 000 hectolitres de noir animal vendus à Nantes comme engrais 2 500 000 hectolitres de tourbe. « Cette substance vaut environ 0 fr. 80 l'hectolitre, on peut estimer au moins à 4 francs le prix auquel elle a été vendue dans les mélanges, c'est donc 10 millions de francs qui ont été prélevés sur l'agriculture bretonne par le commerce des engrais. »

Pour moraliser ce commerce, il fallut faire comprendre aux cultivateurs qu'ils n'avaient aucune sécurité s'ils n'achetaient pas sur analyse. Ce fut long, et bientôt même le mode de dosage rapide, qu'on avait imaginé, permit de nouvelles tromperies aussi préjudiciables que les anciennes. Le dosage régulier de l'acide phosphorique des engrais, très bien réglé aujourd'hui, était pénible jadis, et tant qu'on eut affaire à du noir animal

fraudé seulement par des additions de tourbe ou de coke, on put employer, sans commettre de bien grosses erreurs, un procédé d'une exécution très facile, à la portée des chimistes les moins exercés. On attaquait l'engrais par de l'acide chlorhydrique bouillant qui dissout le phosphate de chaux; on filtrait, et en saturant par de l'ammoniaque, on voyait apparaître un précipité blanc, floconneux, gélatineux de phosphate de chaux; on recueillait sur un filtre, on calcinait et on pesait; on avait ainsi avec une approximation un peu grossière la teneur en phosphate de l'engrais. Tolérable quand il s'appliquait à des os calcinés, ce dosage conduisit à des erreurs prodigieuses quand il fut employé pour déterminer la composition de la poudre de nodules qui s'est peu à peu substituée au noir animal; en effet, l'acide chlorhydrique bouillant dissout dans cette poudre non seulement le phosphate de chaux, mais aussi de l'alumine et de l'oxyde de fer, et quand ensuite on sature par l'ammoniaque, on précipite pêle-mêle le phosphate, l'oxyde de fer, l'alumine. On calcine ce mélange, on le pèse, on inscrit son poids comme phosphate de chaux pur. Ce n'est pas tout : il existe dans le département d'Ille-et-Vilaine des schistes qui, réduits en poudre, présentent une couleur analogue à celle des nodules, et peuvent leur être mélangés sans que leur aspect soit changé; en outre, ces schistes s'attaquent aisément par l'acide chlorhydrique, le mélange d'alumine et d'oxyde de fer qu'on précipite de cette dissolution a le même aspect que le phosphate de chaux; de là

l'addition, en proportions énormes, de ces schistes sans valeur fertilisante, aux engrais phosphatés. On vendait sur garantie à l'*analyse commerciale*, c'est-à-dire à celle qui se bornait à peser le précipité obtenu par la saturation ammoniacale. Combien de millions ont été extorqués de cette façon? Nul ne le sait!

Ce ne sont pas seulement les phosphates qui sont fraudés : on vend du nitrate de soude mélangé à du sel ordinaire, même à du sable; des tourteaux à la sciure de bois; mais c'est surtout dans les mélanges formés de plusieurs matières fertilisantes et décorés de noms pompeux que les prix sont majorés. De petits commerçants interlopes achètent, aux grandes usines, des matières premières, les mêlent, puis envoient, au travers des campagnes, des commis beaux parleurs... Ils s'adressent de préférence aux paysans les plus illettrés, font crédit..., on ne paiera qu'après la récolte; les paysans se laissent tenter et finissent par avoir donné des sommes assez rondes pour des engrais de médiocre valeur.

Il fallait mettre un terme à ces indignes tromperies; on a multiplié les laboratoires agricoles, les chimistes qui les occupent n'obtiennent leur poste qu'après un examen très sérieux, démontrant leur habileté aux analyses; si leurs résultats sont contestés, ils sont soumis à l'appréciation de chimistes experts choisis parmi les savants qui s'occupent des questions agricoles : les méthodes analytiques à employer sont connues, fixées, enfin une loi sévère, promulguée le 5 février 1888, force les marchands d'engrais à indiquer la composition

des matières fertilisantes qu'ils livrent au commerce. La fraude devient difficile, elle disparaîtra sans doute un jour, mais nous n'y sommes pas encore.

Les cultivateurs ont fini par reconnaître que le mieux cependant était de ne plus s'exposer à être trompés. Ils se sont associés, ont formé des syndicats, qui depuis plusieurs années fonctionnent régulièrement. A la fin de l'hiver, au moment où le cultivateur sait quels engrais de commerce il devra employer et quelles quantités lui sont nécessaires, il envoie sa commande au syndicat qui siège dans une ville voisine de son exploitation. Quand toutes les commandes sont arrivées, le syndicat fait venir de Dunkerque ou du Havre le nitrate de soude, des grandes usines les superphosphates, des consignataires de mines les phosphates pulvérisés, puis adresse à chacun des adhérents les matières fertilisantes demandées : elles proviennent d'établissements considérables, dont la loyauté est connue ; aucune fraude n'est à craindre, puisque les intermédiaires ont disparu. Si même il reste quelques doutes, on prélève dans les magasins du syndicat les échantillons à analyser, et les dépenses qu'entraîne cette analyse, réparties entre de nombreux adhérents, deviennent insignifiantes pour chacun d'eux.

Grâce à cette série de sages mesures, le commerce des engrais s'est beaucoup étendu ; il a triplé depuis vingt ans, la France consomme aujourd'hui 180 000 tonnes environ de nitrate de soude, 30 000 tonnes de sulfate d'ammoniaque ; si on y joint les phosphates,

les tourteaux, les engrais de potasse, on arrive à une somme totale de 120 millions de francs.

§ VI

Emploi des engrais chimiques.

Un effort considérable a donc été fait; mais, tout de suite, on est frappé de la médiocrité des résultats obtenus. Comment se fait-il que les dépenses effectuées n'aient pas conduit à des rendements suffisants pour assurer la rémunération du travail et qu'il faille sans cesse avoir recours à des remaniements de douane pour élever artificiellement les prix? Ces engrais n'ont donc pas toute l'efficacité qu'on leur avait attribuée?

La question mérite qu'on s'y arrête, et tout d'abord il faut remarquer que les engrais de commerce ne sont employés que sur une faible fraction de notre territoire. La statistique de 1882 fixe à 26 millions d'hectares environ la surface des terres labourables de notre pays; les 120 millions de francs consacrés à l'achat des engrais ne représentent pas 5 francs par hectare. Or une petite fumure aux engrais chimiques comprenant 150 kilos de nitrate de soude et 300 kilos de superphosphates vaut au moins 60 francs. Cette fumure ne s'applique donc qu'à 2 millions d'hectares, les 24 autres millions en sont privés. Si toutes nos terres labourables recevaient tous les deux ans cette fumure, ce ne serait

pas 120 millions de francs qu'il faudrait dépenser chaque année, mais plus de 700 millions... Nous en sommes loin!

Le plus grand nombre de nos cutivateurs néglige encore les engrais du commerce : nos paysans économes et têtus ne se décident qu'à la longue ; ils y viendront, mais lentement, car si la grande armée agricole ignore les marches rapides, son mouvemement est continu.

On ne saurait donc trouver un argument contre l'emploi des engrais dans la faiblesse des rendements de l'ensemble de notre pays, puisque d'immenses étendues en sont privées; et pour apprécier la valeur des matières fertilisantes nouvellement introduites, il faut concentrer son attention sur les régions où elles sont régulièrement utilisées.

Quand il y a trente ans les expériences de laboratoire eurent démontré l'influence qu'exercent sur la végétation le sulfate d'ammoniaque, le nitrate de soude, les superphosphates, le chlorure de potassium, il y eut un mouvement d'enthousiasme; la parole ardente de M. Georges Ville suscita les plus brillantes espérances; on crut que les engrais chimiques allaient profondément modifier notre système de culture... Il fallut en rabattre ; après des succès pompeusement annoncés, on enregistra de fréquents mécomptes, et l'expérience longtemps prolongée montra que la fumure aux engrais chimiques n'est pas plus efficace que celle au fumier de ferme.

Les exemples abondent : sir J.-B. Lawes et sir H. Gilbert ont maintenu pendant plus de cinquante ans

la culture de blé sur la même pièce dans le domaine de Rothamsted : les parcelles qui ont reçu chaque année du fumier de ferme ont fourni en moyenne 30 hectolitres de grain comme celles qui ont reçu un engrais composé de nitrate de soude, de superphosphates, de sulfates de potasse et de magnésie.

Sur les terres légères comme celles de Grignon, la fumure aux engrais chimiques sans fumier ne donne que de faibles récoltes de betteraves ; en 1887, j'obtenais 38 tonnes de betterave à sucre à l'hectare avec du fumier, 18 avec des engrais chimiques; en 1888, les différences sont moindres, mais dans le même sens, 42 tonnes avec le fumier, 25 avec les engrais chimiques.

Sur les pommes de terre, les engrais chimiques sont plus avantageux; mais, quoi qu'il en soit, leur efficacité n'est pas telle qu'on puisse avantageusement substituer à la vieille culture, s'appuyant sur la production du fumier, de nouvelles méthodes basées exclusivement sur l'emploi des engrais chimiques.

Parfois même cette substitution est désastreuse; les terres privées de fumier mais additionnées de nitrate de soude, de superphosphates, de sels de potasse, changent de nature physique, elles deviennent dures, les argiles se lissent, forment des mottes irréductibles, les travaux ne peuvent plus s'exécuter; plusieurs des parcelles de mon champ d'expériences de Grignon ont été stérilisées pendant plusieurs années par l'application de fortes doses de sulfate d'ammoniaque.

L'emploi exclusif des engrais solubles présente encore

une autre difficulté : ils sont facilement entraînés par les pluies, de telle sorte qu'on est conduit à exagérer les doses dans l'espoir qu'une fraction de l'engrais distribué persistera et soutiendra la végétation pendant toute sa durée; mais outre que ces copieux épandages sont fort coûteux, ils exercent, quand la saison n'est pas très pluvieuse, de fâcheuses influences : les céréales continuent de végéter jusqu'à une époque avancée, s'allongent, la paille devient démesurée, la maturation se fait mal. Pour les betteraves, les inconvénients des fortes fumures azotées ne sont pas moindres; les feuilles restent en pleine vigueur jusqu'à l'arrière-saison, les racines sont pauvres, elles se chargent de salpêtre qui nuit à la santé des animaux qui consomment ces racines ou gêne l'extraction du sucre.

Après des essais généralement malheureux, on a renoncé presque partout à l'emploi exclusif des engrais salins ; on leur a réservé le rôle d'engrais complémentaires, venant soutenir, fortifier les fumures de fumier de ferme, de tourteaux, d'engrais vert : c'est à cet usage qu'ils sont propres et ainsi employés ils rendent des services inappréciables. Parmi les milliers d'exemples qu'on pourrait présenter pour appuyer cette méthode universellement appliquée aujourd'hui dans la région septentrionale de notre pays, où l'on pratique la culture intensive, en Belgique, en Angleterre ou en Allemagne, je choisirai une série d'expériences très bien disposée par sir Henry Gilbert. Elle porte sur une culture de pommes de terre continuée pendant dix ans ;

on ne plantait pas à ce moment les variétés prolifiques utilisées aujourd'hui, et les rendements ne sont que médiocres, mais la comparaison est instructive. De 1876 à 1881, on récolte sans engrais 5 711 kilos de tubercules à l'hectare, 13 138 avec du fumier de ferme, 14 012 avec du fumier et du superphosphate, 17 856 avec du fumier, du superphosphate et du nitrate de soude : sur ces dernières parcelles, on cesse de répandre les engrais chimiques de 1882 à 1887, on se borne au fumier de ferme, la récolte tombe à 10 070 kilogrammes.

Quand on ajoute ainsi les engrais chimiques à une bonne fumure de fumier de ferme, on augmente la récolte, et c'est là un point important, mais ce qui l'est davantage encore, c'est qu'on peut impunément réduire la fumure de fumier. En 1885, j'ai essayé sur une variété de blé nouvellement introduite à Grignon de très fortes fumures de fumier de ferme pour apprécier la résistance à la verse qu'elle présentait.

J'ai répandu la valeur de 50 tonnes de fumier à l'hectare, sur une parcelle, et sur les champs voisins 30 tonnes seulement, mais en outre 200 kilos de nitrate de soude ; la saison a été très favorable et, contrairement à ce que je supposais, la fumure excessive employée n'a pas fait verser le blé à épi carré ; les récoltes ont été très fortes, j'ai obtenu sur l'une des parcelles 40 quintaux métriques de grains et sur l'autre 41 quintaux métriques, c'est plus de 50 hectolitres ; ainsi l'épandage de 200 kilos de nitrate de soude avait suffi à

remplacer 20 tonnes de fumier. En 1888, les rendements du champ d'expériences ont été excellents, mais tandis que le blé à épi carré, fumé à raison de 30000 kilos de fumier, ne donnait que 35 hectolitres 3, il en fournissait 52 hectolitres 5 avec 10000 kilos de fumier et 200 kilos de nitrate de soude; la même année, des récoltes de betteraves à sucre s'élevant à 40 tonnes à l'hectare ont été identiques soit avec 60 tonnes de fumier, soit avec 30 tonnes et 200 kilos de nitrate de soude.

Ce n'est pas sur l'abondance de ces récoltes exceptionnelles que je veux insister, c'est sur la possibilité de les obtenir en remplaçant une partie de la fumure au fumier de ferme par des engrais salins, car ce résultat maintes fois obtenu est du plus haut intérêt.

Ce qui a longtemps paralysé nos cultivateurs, c'est l'impossibilité matérielle où ils se trouvaient de produire une quantité de fumier suffisante pour soutenir énergiquement leurs récoltes. La production du fumier est, en effet, étroitement liée aux ressources fourragères du domaine; ces ressources elles-mêmes sont sous la dépendance des saisons; naguère une mauvaise récolte de foin entraînait la vente à bas prix du bétail; c'est là ce que nous ne savons pas encore éviter, et les pertes que la sécheresse de 1893 a causées dans la plupart de nos départements ont été considérables; mais jadis la diminution du bétail avait un retentissement plus funeste qu'aujourd'hui sur les récoltes suivantes. Pas de bétail, pas de fumier; diminution des fumures, amoindrissement des rendements.

Le mal est moindre maintenant, car nous pouvons substituer au fumier manquant les engrais du commerce; c'est là leur rôle; il ne s'agit plus, comme on l'a cru à l'origine, de transformer toute l'économie rurale, d'abandonner l'élevage ou l'engraissement des animaux et de proscrire les fumures organiques: les engrais chimiques ne sont pas destinés à remplacer le fumier de ferme, mais à parer à son insuffisance.

§ VII

Conclusion.

Nous voici arrivé à la fin de cette longue étude, et il faut conclure. Le fumier de ferme, partout où sa production n'est pas onéreuse, reste la base de tout notre édifice agricole; le produire à bon compte, le problème dont la solution est la plus urgente; et comme nous avons osé le prédire en 1893, la terrible sécheresse que nous avons subie, la pénurie de fourrages qu'elle a occasionnée, n'ont pas été sans quelques avantages. Tous les journaux agricoles sont remplis d'indications sur l'utilisation, par le bétail, des feuilles d'arbres, des ramilles, et il est vraisemblable qu'une fois l'habitude prise de ne plus dédaigner les ressources forestières, de soumettre à une exploitation régulière les *prairies en l'air,* on n'y renoncera plus.

En outre, là où le fumier est rare, on commence à

employer plus souvent les engrais verts; depuis que MM. Hellriegel et Wilfarth nous ont démontré que les légumineuses fixent l'azote de l'air, nous commençons à comprendre l'immense parti qu'on en peut tirer. non plus seulement comme ressource fourragère, mais comme productrices d'engrais, soit que dans les terres à bon marché on consacre toute une saison à les cultiver pour les enfouir à l'automne. soit, ce qui est facile à pratiquer, même dans les pays où le prix de location est élevé, qu'on les sème seulement après la moisson, en cultures dérobées, pour les enterrer par les grands labours d'automne. Les engrais verts sont les succédanés du fumier, ils apportent comme lui, outre des matières azotées, les principes végétaux qui se transforment en humus, et conservent au sol un de ses plus précieux éléments.

Enfin, nous savons où trouver aujourd'hui les phosphates; le marché est bien garni, l'Europe, l'Amérique, exploitent régulièrement les gisements signalés; notre Algérie et notre Tunisie ajoutent leur contigent, et les découvertes de ces engrais se sont succédé si rapidement depuis trentre ans, que l'avenir nous réserve certainement des ressources inépuisables. Nous n'avons donc aucune crainte que les phosphates fassent défaut: il en est de même de la potasse, dont au reste l'efficacité est moindre, car la plupart des sols argileux renferment d'assez larges approvisionnements pour que l'acquisition des sels de potasse soit souvent inutile.

Ainsi à l'aide du fumier de ferme ou des engrais verts

nous assurons à nos sols l'humus et les matières organiques azotées nécessaires à la végétation ; les gisements de phosphates et de sels de potasse actuellement en exploitation nous fourniront pendant de longues années tous les engrais minéraux nécessaires... Tout cela cependant est encore insuffisant. Pour atteindre les hauts rendements, seules sources des bénéfices qui fuient devant nous, malgré la condescendance du législateur à remanier, à chaque crise, les tarifs de douane, il nous faut des engrais azotés à évolution rapide, et ici, il convient de s'arrêter encore un instant.

En vingt-cinq ou trente ans l'agriculture européenne a épuisé le guano : elle exploite aujourd'hui avec une fiévreuse ardeur le nitrate de soude du Pérou; combien de temps cette exploitation pourra-t-elle durer, nous l'ignorons; mais ce nitrate a la même origine que le guano, il ne se reproduit pas... on en verra la fin: d'autre part les progrès de l'hygiène rendront bientôt impossible la préparation du sulfate d'ammoniaque: il faut donc prévoir le moment où nous serons privés de ces deux puissants agents de fertilité. A ce moment, que ferons-nous?

Leur rôle est parfaitement défini : nous avons besoin, pour pousser nos récoltes jusqu'à les rendre rémunératrices, de disposer, au printemps, de 100 kilos par hectare d'azote assimilable ; en général nos fumures de fumier de ferme, d'une lente évolution, ne les produisent pas, et c'est pour compenser leur insuffisance que nous

distribuons nitrate de soude ou sulfate d'ammoniaque.

La situation est singulière; d'innombrables analyses nous ont enseigné que nos terres cultivées renferment de un à deux millièmes d'azote combiné, c'est-à-dire par hectare, de 4 000 à 8 000 kilos, par conséquent de 40 à 80 fois la quantité qui nous est nécessaire; notre maladresse actuelle est telle que nous sommes incapables d'arracher à cette masse de matière inerte de quoi soutenir nos récoltes, et que nous sommes contraints d'envoyer voiliers sur vapeurs doubler le cap Horn pour aller nous chercher sur la côte du Pacifique l'azote combiné, qui est là, sous nos pieds, et que nous ne savons pas utiliser.

Est-il donc possible de tirer de notre sol lui-même les nitrates dont nous avons besoin?

Pendant l'année, mars 1892-mars 1893, les eaux qui ont traversé une terre des cases de végétation de Grignon, qui venaient d'être construites, laissées en jachère sans fumure, ont entraîné la valeur de 221^{kil},4 d'azote nitrique à l'hectare; c'est plus du double de ce qu'exige une récolte très abondante. Pendant l'année suivante : mars 1893-mars 1894, cette quantité d'azote nitrique est tombée à 79^{kil},198. Pourquoi cette différence? C'est que pendant la première année d'observations, les eaux traversaient une terre qui avait été remuée au moment de son extraction, aérée pendant la construction des cases, de nouveau au moment du remplissage, tandis que pendant l'année suivante elle

n'a été travaillée qu'à la surface par la bêche de l'ouvrier[1].

Ainsi, et c'est là un point sur lequel on ne saurait trop insister, quand une terre est convenablement remuée, aérée, travaillée, l'azote habituellement inerte qu'elle renferme, évolue, devient soluble, assimilable; la matière organique azotée de l'humus, attaquée par les ferments, se réduit en acide carbonique, en eau, en nitrates, et si nous en sommes encore réduits à acquérir ces nitrates, c'est que le travail du sol, tel que nous le pratiquons aujourd'hui, est inefficace. C'est aux ingénieurs à se mettre à l'œuvre, c'est à eux qu'il appartient d'imaginer un instrument qui divise, remue, secoue, aère le sol tout autrement que ne le font encore nos charrues et nos herses, qui certainement, dans cinquante ans d'ici, seront reléguées dans les magasins de curiosités à côté des pieux durcis au feu des sauvages ou des araires des Gaulois.

Nous n'avons même aucune crainte que, par ce travail énergique, le stock d'azote de nos sols s'épuise rapidement. Non seulement les recherches de M. Berthelot nous ont enseigné que nos terres sont peuplées de micro-organismes, qui fixent l'azote de l'air, mais en outre, tout récemment, l'illustre secrétaire perpétuel, puis M. Winogradsky, ont isolé, décrit, cultivé ces micro-organismes; ces dernières découvertes datent de quelques mois. Qui peut prévoir ce que leur réserve l'avenir!

1. *Le travail du sol et la nitrification.* — *Annales agronomiques*, t. XIX, p. 401. — *Revue scientifique*, juin 1895.

Nous savons encore que les ferments nitriques de MM. Schlœsing, Muntz et Winogradsky travaillent dans le sol pour rendre assimilable l'azote qu'il renferme : ce qu'il nous faut apprendre maintenant, c'est à créer un *milieu de culture* favorable à leur action, et quand nous saurons disséminer les ferments dans une terre meuble et bien aérée, nous pourrons envisager sans crainte l'épuisement du nitrate de soude du Pérou. On peut le dire avec certitude : le règne des engrais azotés finit, celui des bactéries commence!

C'est à l'étude des ferments du sol qu'est consacrée la seconde partie de ce volume.

DEUXIÈME PARTIE

LES FERMENTS DE LA TERRE

CHAPITRE PREMIER

LA FIXATION DE L'AZOTE DANS LE SOL

Il y a quarante ans, les notions acquises sur la fermentation tenaient dans un court chapitre des traités de chimie; aujourd'hui que M. Pasteur a démontré que la génération spontanée est une chimère, que les liquides les plus altérables persistent à leur état primitif tant qu'ils sont préservés des germes des bactéries ou des végétaux cryptogamiques, qu'il a fait voir que la matière organisée n'est ramenée aux formes simples qui permettent à ses éléments de rentrer dans la circulation générale que sous l'influence des micro-organismes, on comprend quel rôle immense remplissent dans ce monde les infiniment petits dont le microscope seul nous révèle la présence.

On sait quelle a été l'admirable évolution de la médecine et de la chirurgie depuis qu'elles ont été éclairées par le génie de notre illustre compatriote ; on sait que les pansements antiseptiques, la découverte des vaccins, ont préservé de la mort des millions d'êtres vivants; on sait encore que nombre d'industries, la fabrication de la bière, celle du vinaigre, ont acquis des méthodes sûres de travail; on espère que bientôt il en sera de même de l'art de faire du vin. Enfin, comme pour montrer qu'aucune des branches de l'activité humaine tenant à l'exploitation des êtres vivants, ne peut se dérober à la puissance des ferments, la culture elle-même doit compter avec eux. Comment interviennent-ils pour fixer dans le sol un des plus puissants éléments de fertilité : l'azote? Comment agissent-ils pour modifier, transformer les résidus qui proviennent des végétations antérieures ou ceux qu'ils élaborent eux-mêmes et les rendre assimilables par les végétaux? C'est là ce que je veux étudier dans cet écrit.

§ I

Les ferments pathogènes du sol.

La terre renferme les germes d'une multitude de micro-organismes[1], parfois ils appartiennent aux

1. M. Duclaux, de l'Académie des Sciences, a consacré plusieurs articles à leur étude dans les *Annales de l'Institut Pasteur*, t. I, III, IV.

espèces pathogènes. Les personnes qui ont habité la campagne et particulièrement les départements comme celui de l'Eure-et-Loir, de l'Oise ou de Seine-et-Marne, où sévissait la maladie connue sous le nom de *charbon* ou de *sang de rate*, ont entendu parler de *champs maudits*, sur lesquels les vieux bergers se refusaient à conduire les animaux; on a cru longtemps à des préjugés..., il a fallu se rendre; les champs maudits existent. Ce sont les endroits où ont été enterrés les animaux morts du charbon. Les germes de la maladie infectieuse persistent dans le sol pendant de nombreuses années, ils sont ramenés à la surface par les vers de terre, et quand les fosses où ont été enfouis des animaux charbonneux sont cultivées en céréales, elles restent, après la moisson, couvertes de chaumes, et sont à ce moment particulièrement dangereuses. Les pointes aiguës des pailles coupées blessent fréquemment les moutons qui ont l'habitude de flairer le sol; le virus s'introduit par les légères piqûres que se font les animaux, et les troupeaux paient un large tribut à la maladie.

Les végétaux eux-mêmes, développés sur ces terres contaminées, sont dangereux. Un mouton charbonneux est enfoui dans un champ ensemencé en trèfle, la plante devient luxuriante au-dessus de la fosse. Une femme dérobe ce trèfle et le donne à manger à une chèvre et à une vache, restées l'une et l'autre à l'étable : les deux animaux meurent.

Cette persistance des germes virulents dans le sol est

assez longue : on parque sept moutons sur une terre où, douze ans auparavant, ont été enfouis des animaux charbonneux; deux périssent bien que la terre fût nue et que les moutons ne reçussent aucune nourriture sur le sol infesté. Les bactéries sous leur forme active ne vivent pas dans le sol, mais les germes, les spores brillantes que connaissent toutes les personnes qui ont suivi les cultures des microbes et qui sont la semence de ces redoutables organismes, ont, au contraire, une vitalité prolongée.

Au reste, les dangers que faisait courir aux troupeaux la persistance dans le sol de ces virus disparaissent peu à peu, depuis qu'ont été découverts les vaccins qui rendent les animaux inoculés insensibles à l'action des virus les plus violents.

C'est ce qui a été démontré avec une admirable netteté dans la célèbre expérience du **2** juin **1881**, connue sous le nom d'expérience de Pouilly-le-Fort, organisée par MM. Pasteur, Chambreland et Roux pour démontrer l'efficacité du vaccin charbonneux. Cinquante moutons furent partagés en deux bandes, vingt-cinq moutons vaccinés résistèrent à l'inoculation d'un virus charbonneux qui fit périr en deux jours les vingt-cinq autres moutons non vaccinés. En détruisant par l'acide sulfurique les cadavres des animaux charbonneux, en procédant largement aux vaccinations préventives, on a vu déjà cette maladie qui décimait les troupeaux devenir plus rare et on peut prédire que, dans peu d'années, elle aura complètement disparu.

Bien d'autres maladies infectieuses paraissent être dues aux germes qui conservent leur vitalité dans le sol. Sans parler des fièvres intermittentes, du paludisme[1], peut-être de la fièvre jaune, le tétanos est également une maladie microbienne et atteint surtout les personnes dont les blessures sont en contact direct avec le sol, particulièrement lorsqu'il a été contaminé par les déjections solides des chevaux.

De très bons esprits ont été effrayés des irrigations aux eaux d'égout établies aux portes de Paris, dans la presqu'île de Gennevilliers, ils ont craint que le sol ne retînt les germes des maladies infectieuses et ne devînt une source constante d'insalubrité. Il ne semble pas que ces craintes soient fondées ; si, en effet, les germes pathogènes persistent souvent dans le sol pendant plusieurs années, surtout lorsqu'ils sont enfouis dans les profondeurs, ils s'atténuent quand, les terres étant cultivées, remuées par les instruments, ces spores amenées au jour sont soumises à l'action de l'air et de la lumière.

Nous n'insisterons pas au reste sur ces ferments pathogènes du sol, car, si intéressante que soit leur étude, elle n'exerce aucune influence sur la production végétale, que nous avons seule en vue.

1. M. le docteur Laveran a résumé récemment ses remarquables recherches sur le paludisme, dans un des petits volumes des *Aide-Mémoire*, publiés sous la direction de M. Léauté, membre de l'Institut.

§ II

Les sols maintenus en prairie permanente s'enrichissent d'azote atmosphérique.

Quand on soumet des graines, des grains de blé, par exemple, à l'analyse, de façon à connaître leur composition, on y distingue facilement trois matières principales : de l'amidon, la poudre blanche bien connue, qui, gonflée dans l'eau chaude, fournit l'empois, employé pour donner au linge la rigidité nécessaire à quelques parties de notre ajustement ; de la cellulose, qui reste dans le son, séparé de la farine par le blutage ; et enfin du gluten, matière grisâtre, molle, élastique, se prenant facilement en une pâte liante.

Si on cherche quelle est la composition élémentaire de ces trois matières, si, en d'autres termes, on détermine le poids des divers corps simples qui constituent ces trois principes : amidon, cellulose, gluten, on trouve que, tandis que les deux premiers sont exclusivement formés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène (ces deux derniers éléments dans les rapports de poids qu'ils présentent dans l'eau), le gluten renferme, outre le carbone, l'oxygène et l'hydrogène, un quatrième corps simple : l'azote. Quand on brûle l'amidon ou la cellulose, on ne perçoit aucune odeur forte. Il n'en est plus de même du gluten. La calcination dégage ces produits à odeur

nauséabonde que connaissent tous ceux qui, par mégarde, ont brûlé de la laine, des poils ou des plumes. La combustion des grains de blé entiers laisse en outre des cendres particulièrement formées de phosphates de potasse et de magnésie, et la présence de ces phosphates, reconnue dans toutes les graines depuis Th. de Saussure, fait comprendre l'utilité agricole des phosphates et l'immense commerce qui se fait aujourd'hui de ces précieux engrais.

Pour savoir comment le blé acquiert les éléments nécessaires à sa croissance, comment un grain confié au sol s'y développe et donne une plante qui, au moment de la moisson, renfermera vingt ou trente grains semblables à celui qui a germé, on sème ce grain de blé dans un sol formé exclusivement de sable calciné, on y ajoute des substances minérales : phosphate de potasse, sulfate de magnésie, chlorure de potassium, carbonate de chaux et, en outre, de l'azotate de chaux. On arrose régulièrement et on réussit à obtenir une récolte analogue à celle que fournit une bonne terre ordinaire ; comme le carbone, qui forme les quatre dixièmes environ du poids total de la récolte, ne figure dans les matières ajoutées au sable que sous forme d'acide carbonique, on est convaincu que cet acide est l'origine du carbone contenu dans les végétaux. La petite quantité d'acide carbonique contenue dans notre atmosphère suffit, en effet, à l'alimentation carbonée des plantes, qui décomposent l'acide carbonique, s'en assimilent le carbone et rejettent l'oxygène, aussitôt que leurs parties vertes,

que les cellules à chlorophylle sont soumises aux radiations lumineuses.

La culture du blé en sable calciné ne réussit pas, si le sol ne renferme que des matières minérales, si on n'y ajoute pas un azotate, de l'azotate de chaux, par exemple; quand ce sel fait défaut, la plante reste petite, chétive, elle meurt généralement avant d'avoir pu former des graines nouvelles; cet azotate exerce une influence tellement décisive sur le développement de la plante que, lorsqu'il est distribué parcimonieusement, mais en doses croissantes, le poids de la récolte augmente régulièrement avec la quantité de nitrate employée [1].

Ces faits, notés par tous les observateurs, méritent une sérieuse attention. Il est curieux de constater que les végétaux utilisent les très minimes quantités d'acide carbonique que renferme notre atmosphère et que, malgré son abondance, l'azote, qui forme les quatre cinquièmes de l'air atmosphérique, paraisse ne pouvoir exercer aucune influence sur la croissance du blé. La plante dépérit, bien que sa tige s'élance dans cette atmosphère riche en azote, tant que sa racine ne trouve pas dans le sol l'azote combiné à l'oxygène et à une base et constituant un azotate.

Si cette expérience, répétée à bien des reprises différentes, démontre clairement que l'azote atmosphérique

1. Les expressions : nitrate ou azotate, désignent la même classe de sels; le nitrate ou azotate de potasse est souvent encore nommé nitre ou salpêtre.

n'est pas directement utilisé, par le blé ou les plantes semblables, à la formation de leurs matières azotées, il n'est pas douteux cependant que l'azote atmosphérique ne contribue parfois, au moins d'une façon indirecte, à l'alimentation végétale. Cela ressort de toute évidence de la luxuriance des forêts tropicales, de la persistance pendant des siècles de la végétation herbacée des steppes, des grandes plaines herbues du continent américain : dans cette immense étendue qui commence seulement à être mise en culture, la terre, bien qu'elle n'ait jamais reçu aucun engrais azoté, présente une richesse en azote combiné, bien supérieure à celle que décèle l'analyse de nos terres cultivées, régulièrement fumées.

En France, les terres de prairies ont été étudiées comparativement aux terres arables qui sont travaillées chaque année et reçoivent des engrais, et contrairement à ce qu'on aurait pu penser, ce sont les terres maintenues en prairies permanentes qui présentent la plus haute teneur en azote combiné. Tandis que nos terres arables ne renferment guère que 1 à 2 millièmes d'azote appartenant à des matières organiques, on dose 4, 5, 6, jusqu'à 10 millièmes d'azote dans le sol des prairies permanentes, même des prairies hautes de montagne sur lesquelles il est absolument impossible de faire arriver des engrais.

Or, quand on calcule le poids d'azote combiné que renferme la terre d'un hectare, d'après les données fournies par l'analyse, on trouve qu'en moyenne la

terre d'un hectare prise jusqu'à une profondeur de $0^m,35$ pèse environ 4 000 tonnes de 1 000 kilos ; on voit, par suite, qu'un millième correspond à 4 000 kilos, et 10 millièmes constatés, ainsi qu'il vient d'être dit, dans le sol de quelques prairies, à 40 000 kilos : visiblement ce stock énorme de matière organique azotée ne peut avoir pris son élément le plus précieux, son azote, qu'à l'immense réservoir de l'atmosphère.

Cette fixation de l'azote atmosphérique dans les sols des prairies permanentes est au reste assez rapide pour qu'il soit possible de le constater par l'expérience.

Sir J.-B. Lawes, correspondant de notre Académie des Sciences, a consacré, depuis cinquante ans, le domaine qu'il possède à Rothamsted, en Angleterre, à une faible distance de Londres, à une série d'expériences que connaissent et qu'admirent tous les agronomes. Secondé par sir Henry Gilbert, il a largement contribué à éclairer nombre de questions relatives à la croissance des végétaux cultivés, à l'entretien des animaux domestiques. Parmi les nombreuses expériences exécutées à Rothamsted, l'une d'elles nous intéresse particulièrement. En 1856, MM. Lawes et Gilbert transformaient en prairie une portion du domaine de Rothamsted qui, depuis de longues années, n'avait servi qu'à la culture des céréales. Le sol renfermait alors $1^{gr},52$ d'azote par kilo de terre ; on l'a fumé régulièrement et à doses telles que toujours l'azote des engrais dépassât celui des récoltes fauchées, de 15 kilos environ chaque année.

Ce maigre excédent est à peine suffisant pour couvrir les pertes d'azote qu'occasionnent les eaux de drainage qui s'infiltrent dans le sous-sol, et si l'azote de l'air n'intervenait pas, on devait trouver après quelques années que la terre avait conservé à peu près sa richesse initiale; l'azote introduit par les engrais étant, d'une part, consommé par les végétaux, de l'autre, entraîné par les eaux qui s'infiltrent dans le sous-sol. Il fut loin d'en être ainsi. A la fin de l'année 1888, 1 kilo de terre accusait $2^{gr},35$ d'azote. Si on calcule les changements survenus dans un hectare de 4000 tonnes, on trouve que la terre qui renfermait à l'origine 6080 kilos, en accusait, en 1888, 9400 kilos. Le gain de $0^{gr},83$ par kilo devient 3320 kilos pour un espace de trente-deux ans, ou de 103 kilos par an.

Le phénomène est d'ailleurs progressif, et rien dans son allure ne peut faire supposer qu'il approche de sa limite.

J'ai moi-même, dans une expérience de moindre durée, observé des faits analogues au champ d'expériences de Grignon. En 1879, une terre appauvrie par la culture, ne dosant plus que $1^{gr},50$ d'azote par kilo, fut ensemencée en sainfoin, dont la culture persista jusqu'en 1883. A cette prairie artificielle de légumineuses succéda une prairie de graminées, qui resta toujours sans engrais; on préleva des échantillons de terre en 1881, en 1885 et en 1888; les teneurs furent respectivement $1^{gr},65$, $1^{gr},77$, $1^{gr},98$. A ce moment, le sol d'un hectare avait gagné 1848 kilos d'azote, les plantes récoltées, enlevées chaque année, renfermaient

1 210 kilos d'azote; par conséquent, cette terre avait gagné en dix ans 3 058 kilos d'azote dont la plus faible fraction avait servi à l'alimentation des récoltes, la plus forte avait persisté, constituant cet énorme stock de matières organiques azotées que tous les observateurs ont constaté dans le sol des prairies.

Il est donc incontestable que, si dans une terre calcinée, et pendant la courte durée d'une saison, les gains d'azote sont habituellement trop faibles pour être visibles et pour que les plantes puissent en profiter, ces gains sont considérables pour les terres couvertes de végétaux et soumises au régime de la prairie permanente. Quel est le mécanisme de cette fixation? Sont-ce les plantes qui s'emparent de l'azote atmosphérique par leurs feuilles, puis, laissant dans la terre des débris de toutes sortes, finissent par l'enrichir? Est-ce, au contraire, la terre elle-même qui fixe cet azote atmosphérique? S'y forme-t-il des combinaisons servant ensuite à l'alimentation des plantes? Telles sont les questions qui se dressent devant nous et auxquelles il faut répondre.

§ III

Circulation de l'azote combiné à la surface du globe. Discussion de MM. Boussingault et Georges Ville.

L'origine de l'azote des végétaux a été l'objet d'une discussion, restée justement célèbre, entre Boussingault et M. Georges Ville.

Boussingault était né à Paris, au commencement du siècle. Après avoir passé [1] par l'école des mines de Saint-Étienne, il partit pour l'Amérique avec un médecin, M. le docteur Roulin, qui, plus tard, dirigea longtemps la bibliothèque de l'Institut, et a laissé, parmi ceux qui l'ont connu, la réputation d'un des plus charmants causeurs qu'on pût rencontrer.

Ces messieurs, partis avec l'espoir de fonder un établissement d'enseignement supérieur à Santa-Fé-de-Bogota, trouvèrent le pays en pleine révolution. Il leur fallut brusquement changer leurs projets ! Boussingault entra dans l'état-major de Bolivar, pour lequel il conserva toujours un profond respect; il ne l'appelait jamais que le *libérateur*. Tout en servant l'insurrection comme militaire et comme ingénieur, il recueillit une ample moisson d'observations, envoya à l'Académie des Sciences de Paris des communications qui lui acquirent bientôt une grande notoriété, de telle sorte que, lorsqu'il rentra en Europe, on le casa dans l'enseignement, d'abord à Lyon, puis à Paris, au Conservatoire des arts et métiers, où il a laissé un souvenir impérissable.

Boussingault a créé la science agricole. Bien que Th. de Saussure, au commencement du siècle, eût énoncé nombres de faits du plus haut intérêt, il ne les avait pas réunis en un corps de doctrine. Cette gloire fut réservée à Boussingault; c'est de la publication de

1. Il a laissé des mémoires intéressants, qui sont en voie de publication : sa famille a fait paraître en 1892 le premier volume, dans lequel l'auteur retrace les souvenirs de sa jeunesse.

son *Économie rurale*, en 1837, que date la chimie agricole.

Parmi les questions qui l'occupèrent davantage se trouve celle que nous discutons en ce moment : l'intervention de l'azote atmosphérique dans les phénomènes de la végétation. Le principe de la méthode suivie dans ces études est facile à saisir : un lot de graines est analysé, on sème dans du sable calciné, privé par conséquent de toute matière organique azotée, une graine semblable à celle dont la teneur en azote a été déterminée par un dosage rigoureux; on ajoute à ce sable stérile les matières minérales indispensables au développement de la plante, on arrose avec de l'eau exempte d'ammoniaque; pour se mettre enfin à l'abri de l'ammoniaque atmosphérique, on recouvre les pots d'expériences d'une grande cloche de verre immergée dans de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, de façon à isoler absolument l'atmosphère inférieure, dans laquelle on entretient une quantité d'acide carbonique suffisante pour assurer l'alimentation aérienne de la plante.

A force de soins, en préservant la plante chétive, qui se développe dans ces conditions, de l'ardeur du soleil, on réussit à obtenir une maigre récolte qu'on pèse, qu'on analyse ; on soumet de même à l'analyse la plus grande partie du sable employé, et on compare l'azote introduit dans la graine à celui de la récolte ; l'expérience décide toujours dans le même sens : la plante n'a fixé aucune trace d'azote atmosphérique.

Ces cultures en sable calciné furent répétées de 1851

à 1854, elles portèrent sur des plantes variées et ne donnèrent jamais que des résultats négatifs. Elles étaient exécutées avec beaucoup de soins et semblaient devoir entraîner la conviction. Elles furent cependant hardiment contredites par M. Georges Ville. En répétant les expériences de M. Boussingault, le célèbre professeur du Muséum fut frappé de la gracilité des plantes qui croissent daus les sols absolument privés d'engrais azoté ; aussi se décida-t-il à opérer autrement. Au sable calciné, il ajouta non seulement des engrais minéraux, comme le faisait M. Boussingault, mais, en outre, une quantité bien pesée et faible de nitrate; il obtint ainsi des sujets vigoureux, bien constitués, qui, à la récolte, accusaient infiniment plus d'azote que n'en renfermaient la graine et le nitrate ajouté comme engrais.

Ces expériences délicates ne réussissaient pas toujours. Boussingault en France, MM. Lawes, Gilbert et Pugh en Angleterre, avaient en vain essayé de les répéter, et l'opinion flottait indécise entre ces affirmations contradictoires, quand l'Académie des Sciences, saisie du différend, décida qu'une commission serait chargée de le trancher en faisant répéter les expériences devant elle. M. Chevreul fut le rapporteur, et, bien que pendant la longue durée des essais on eût constaté des irrégularités qui laissaient subsister quelques doutes, Chevreul n'hésita pas à se prononcer en faveur de M. Georges Ville.

Boussingault, loin de se soumettre, continua d'affirmer que l'azote atmosphérique n'exerce aucune action sur

la végétation et, bien qu'il n'apportât à l'appui de son opinion aucune nouvelle preuve décisive, il avait une telle autorité, qu'il entraîna la plupart des agronomes; ils cherchèrent à expliquer la végétation persistante des prairies et des forêts en supposant que les herbes ou les arbres utilisaient à leur profit les faibles quantités d'ammoniaque que renferme l'air ou qu'apportent la pluie et la rosée.

Quand on étudie avec soin la circulation de l'azote *combiné* à la surface du globe, on reste convaincu cependant que, loin de s'enrichir, la terre, au contraire, s'appauvrit constamment au profit de l'océan. Tous nos sols cultivés produisent des nitrates qu'on retrouve parfois en quantités notables dans les eaux de drainage: elles s'infiltrent dans le sous-sol, gagnent les ruisseaux, les rivières, les fleuves, qui sous cette forme entraînent à la mer des quantités formidables d'azote combiné! Boussingault a calculé que la Seine seule emporte en vingt-quatre heures 238 tonnes de nitrate de potasse; et, comme le débit de la Seine est infime par rapport à celui des autres fleuves du monde, on peut concevoir que l'océan reçoit constamment de prodigieuses quantités de nitrates provenant de l'oxydation des matières azotées à la surface des terres cultivées.

Si cependant on cherche à déceler les nitrates dans l'eau de la mer, on n'en trouve pas: mais, en revanche, on y caractérise sans peine de l'ammoniaque; elle en contient 0 milligr. 4 par litre. Le mécanisme de cette métamorphose de l'azote abandonnant l'oxygène avec

lequel il est uni dans l'acide azotique pour s'unir à l'hydrogène et constituer l'ammoniaque des eaux marines n'est pas encore complètement établi ; on peut cependant supposer que les nitrates servent d'aliments aux végétaux marins, qui les réduisent et en forment des matières albuminoïdes comme le font les plantes terrestres, puis, qu'à la mort de ces plantes aquatiques les matières azotées se décomposent : l'ammoniaque serait le résidu de cette décomposition.

Quoi qu'il en soit, cette ammoniaque marine, malgré sa solubilité dans l'eau, s'exhale dans l'atmosphère, où des analyses minutieuses permettent de la retrouver. M. George Ville, puis M. Schlœsing. ont reconnu qu'en moyenne 100 mètres cubes d'air renferment un peu plus de 0gr,002 d'ammoniaque, unie soit à de l'acide azotique. soit surtout à de l'acide carbonique.

Peut-on trouver, dans cette faible quantité d'ammoniaque aérienne, l'origine du gain d'azote constaté dans les cultures de M. Georges Ville, dans les prairies, dans les forêts? Les eaux de la pluie en amènent-elles des proportions un peu plus fortes? L'étincelle électrique qui, nous le savons depuis Cavendish, détermine l'union des deux éléments de l'air, est-elle une autre source d'azote combiné présentant quelque importance? Ces causes réunies vont-elles enfin nous expliquer les gains d'azote dont nous cherchons l'origine?

On l'a cru ; mais il a fallu abandonner cette idée, quand de nombreuses analyses d'eau de pluie, quand des expériences de culture entreprises pour savoir

quelle part pouvait être faite à l'ammoniaque atmosphérique dans le développement des végétaux eurent fait voir que ces apports par les eaux météoriques étaient très faibles et tout à fait insuffisants pour compenser les pertes qui résultent de l'infiltration des eaux de drainage dans les profondeurs du sol.

On était donc dans une grande indécision. Les uns, tenant pour exactes les expériences de M. Georges Ville, admettaient que les plantes saisissent par leurs feuilles aussi bien l'azote que l'acide carbonique et que les gains constatés viennent d'une assimilation directe ; les autres, au contraire, très frappés des nombreux essais négatifs de Boussingault et des agronomes de Rothamsted, niaient cette fixation directe et attendaient de l'avenir l'explication des faits que les interprétations proposées laissaient indécises, quand, en 1885, M. Berthelot fit paraître son premier mémoire sur la fixation de l'azote par la terre arable [1].

§ IV

Fixation de l'azote dans le sol par action microbienne. M. Berthelot. — MM. Hellriegel et Wilfarth.

M. Berthelot avait remarqué que les sables jaunes qui se trouvent au-dessous des meulières et pierres

1. *Comptes rendus*, t. CI, p. 775. — Cette séance fut particulièrement mémorable; c'est ce jour-là que M. Pasteur lut son mémoire sur la méthode à employer pour prévenir la rage après morsure (26 octobre 1885).

siliceuses des plateaux de Meudon et de Sèvres, exposés à l'air pendant quelque temps, ne tardent pas à se couvrir de végétation ; il y détermina rigoureusement l'azote combiné, puis les exposa à l'action de l'air dans une chambre à l'abri de toute émanation. Il procéda à l'analyse à diverses reprises et vit l'azote combiné s'accroître lentement, mais d'une façon continue, le 29 mai 1884, on avait trouvé par kilo 0gr,0705 ; le 30 avril 1885, un kilo renfermait 0gr,0833 : le 10 juillet 0gr,1035 et le 24 octobre 0gr,1105. Un autre sable jaune, une argile blanche, donnèrent des résultats analogues. Les mêmes expériences furent répétées avec les terres précédentes, en plein air : les pots étaient placés sur des tréteaux, dans une prairie, sous un toit qui les préservait de la pluie verticale ; une autre série d'expériences fut disposée au sommet de la tour de 22 mètres, dont on aperçoit la silhouette au-dessus des arbres de Meudon ; enfin, ces mêmes terres furent placées dans de grands flacons bien fermés.

En étudiant les terres, maintenues ainsi en observation pendant plus d'une année, M. Berthelot reconnut que l'augmentation de l'azote n'était due ni à de l'ammoniaque, ni à de l'acide azotique, mais à la formation de matières organiques. Pour connaître leur origine, pour savoir comment elles avaient été produites, M. Berthelot soumit des échantillons de ces divers sols à l'action d'une température de 100 degrés durant plusieurs heures, puis à celle d'un courant de vapeur d'eau prolongé cinq minutes. Pendant le refroidisse-

ment, on ne laissa entrer dans l'appareil que de l'air filtré sur des tampons de coton enduits de glycérine, de façon à retenir tous les germes que l'air pouvait entraîner; les terres furent enfin abandonnées à elles-mêmes, pendant un temps prolongé; on ne put y déceler la moindre fixation d'azote.

Visiblement, quand on porte une terre à 100 degrés, on ne change rien à sa composition, à sa nature physique, mais on tue les micro-organismes qu'elle renferme, et, puisque les terres normales fixent l'azote, mais qu'elles perdent cette propriété aussitôt qu'elles ont été portées à 100 degrés, il faut en conclure que ce sont ces micro-organismes qui sont l'agent de cette fixation.

Les terres mises d'abord en expériences étaient très pauvres en carbone et en azote, elles ne représentaient pas des sols cultivables avantageusement, et il était intéressant de chercher si la fixation de l'azote par action microbienne pouvait se produire encore dans des sols déjà enrichis de matières organiques par des végétations antérieures. C'est ce que fit avec succès M. Berthelot, pendant l'année 1886, pour des sols nus ou couverts de végétaux, notamment d'amarante. Est-ce à dire que toutes les terres soient capables de fixer l'azote atmosphérique, et qu'une terre, dans laquelle cette fixation se produit dans certaines conditions, s'enrichira d'azote si ces conditions sont changées? Non; M. Berthelot s'est efforcé de préciser ces conditions l'année même où sa découverte était vivement attaquée par M. Schlœsing.

On sait que l'éminent directeur de l'École d'application de l'administration des tabacs est un des expérimentateurs les plus habiles de ce temps; il a doté la science agricole de méthodes analytiques excellentes, d'instruments qui conduisent à exécuter les recherches avec plus de précision et de facilité qu'on ne le faisait naguère. Or, M. Schlœsing reprit les expériences de M. Berthelot, en opérant par une autre méthode. Au lieu de chercher la quantité d'azote engagée en combinaison dans la terre arable au commencement et à la fin des observations, il met ces terres en expériences dans un volume d'air soigneusement mesuré et cherche si, après que cet air est resté pendant six mois par exemple avec la terre, une fraction plus ou moins forte d'azote quitte l'état aériforme pour s'engager dans une combinaison solide ; or, dans aucune des expériences qu'il a exécutées en 1887, cette disparition d'azote gazeux n'a pu être constatée.

Toutes les incertitudes reparaissaient. La querelle qui avait séparé pendant de longues années MM. Boussingault et George Ville se ranimait entre MM. Berthelot et Schlœsing.

MM. A. Gautier et Drouin exécutaient bien, en 1888, une série d'expériences à l'aide de sols artificiels laissés nus ou couverts de végétaux, et constataient que ces sols s'enrichissaient d'azote, mais ils n'en tiraient pas cette conclusion que cet enrichissement provînt de l'azote libre de l'atmosphère.

Cette réserve se conçoit aisément. Les chimistes sont

habitués à considérer l'azote comme un gaz inerte; il résiste à l'oxygène, ne s'unissant avec lui qu'en proportions minimes sous l'influence de l'étincelle électrique. On forme encore de petites quantités d'ammoniaque en unissant l'hydrogène et l'azote, quand on soumet un mélange de ces gaz non plus aux manifestations bruyantes de l'activité électrique, mais aux décharges silencieuses désignées sous le nom d'effluves et qui ne sont visibles que dans l'obscurité; mais la résistance que présente habituellement l'azote à pénétrer en combinaison est telle, qu'on était fort étonné de voir ce gaz inerte, indifférent aux forces puissantes que nous mettons en jeu dans le laboratoire, céder à l'activité vitale des microbes du sol. Aussi, quelque illustre que fût le nom de M. Berthelot, quel que soit l'éclat dont rayonne l'œuvre immense qu'il a accomplie, les chimistes, flottant entre les affirmations contradictoires de deux savants de haut mérite, hésitaient à conclure, quand le problème fut abordé en Allemagne par d'autres observateurs, qui démontrèrent la fixation de l'azote atmosphérique, par action microbienne, à l'aide d'expériences décisives.

Les opinions des cultivateurs, leurs modes de travail, reposent presque toujours sur une très longue série d'observations dont on doit tenir compte; or depuis longtemps ils avaient distingué parmi les plantes de grande culture quelques espèces qu'ils appelaient *amélioriantes*. Ils avaient reconnu, par exemple, que lorsqu'on sème du blé ou de l'avoine sur un défriche-

ment de trèfle et de luzerne, il n'est pas nécessaire de distribuer d'engrais et que, sans aucun apport, habituellement la récolte est excellente; la terre semble avoir été enrichie, améliorée par la culture du trèfle ou de la luzerne; en général, par la culture des espèces appartenant à la famille des légumineuses. On avait reconnu en outre, par l'analyse comme par l'emploi de ces fourrages dans l'alimentation des animaux, que ces légumineuses sont très riches en azote et que cependant les engrais azotés n'augmentent pas leur rendement.

On avait donc été conduit à supposer que les légumineuses sont capables de fixer l'azote de l'air, et c'est ce que M. Georges Ville affirmait avoir observé à bien des reprises différentes, mais il s'était heurté contre les expériences de M. Boussingault, qui, opérant avec sa rigueur accoutumée, n'avait pu constater la fixation d'azote libre.

Les expériences de l'éminent professeur du Conservatoire étaient cependant en opposition avec quelques observations de grande culture exécutées avec beaucoup de soins par divers observateurs. En 1873, MM. Lawes et Gilbert divisent en deux parties un champ bien homogène du domaine de Rothamsted; sur l'une des moitiés on sème de l'orge, sur l'autre moitié du trèfle. La récolte de l'orge, soumise à l'analyse, accuse $41^{kil},7$ d'azote, celle du trèfle $169^{kil},5$; on prélève des échantillons de terre sur les deux champs. Il semble *a priori* que le sol qui a porté le trèfle doit être appauvri par

les exigences de la récolte très azotée qu'il a fournie; il n'en est rien. On dose, dans 1 kilo de la terre qui a porté de l'orge, 1gr,450 d'azote combiné, tandis que 1 kilo du sol emblavé en trèfle en renferme 1gr,578. L'année suivante, les deux parties du champ sont l'une et l'autre ensemencées en orge; la récolte obtenue sur la parcelle qui avait déjà porté de l'orge en 1873 renferme 43kil,8 d'azote, celle qui s'est développée dans la partie du champ qui l'année précédente avait porté du trèfle est plus abondante, elle contient 77kil,7 d'azote. Ainsi, bien que le trèfle renferme beaucoup plus d'azote que l'orge, il laisse le sol plus riche que la céréale, et cet enrichissement est non seulement démontré par les dosages, mais aussi par la vigueur de la céréale qui succède à la légumineuse.

Au reste, toutes les expériences du laboratoire n'étaient pas négatives comme celles de Boussingault: M. Georges Ville montrait aux auditeurs de ses cours, des cultures de pois, de haricots vigoureuses, bien qu'elles fussent venues sans engrais azoté. En Amérique, M. Atwater cultive des pois dans du sable calciné, mais soutient leur végétatiou avec des engrais minéraux et de petites quantités d'azotate de potasse, à la récolte, il trouve plus d'azote que n'en contenaient les graines et l'engrais ajouté, les plantes renfermaient un tiers ou même une moitié d'azote en plus de celle que renfermait l'engrais distribué. Même en cultivant du sarrasin, M. Joulie avait constaté également, dès 1885, des gains d'azote sensibles; toutefois rien de décisif n'avait été

publié quand M. Hellriegel communiqua au congrès des naturalistes de Berlin, en septembre 1886 [1], les résultats de ses recherches. Le mémoire définitif dans lequel elles sont exposées ne parut cependant qu'en 1888.

Les expériences ont porté sur la végétation de diverses espèces, cultivées dans des vases de verre renfermant 4 kilos de sable stérile additionné d'un mélange de phosphate de potasse, de chlorure de potassium et de sulfate de magnésie, auquel on ajoutait des doses croissantes de nitrate de chaux. Quand ces engrais sont distribués à l'orge, on voit les jeunes plantes, d'abord à peu près semblables pendant les premières semaines de la végétation, tant qu'elles vivent sur les réserves contenues dans la graine, se distinguer un peu plus tard les unes des autres; celles qui n'ont pas reçu d'engrais azoté présentent alors un état particulier, désigné sous le nom caractéristique de *faim d'azote*. Lorsque les matériaux de la graine sont épuisés, c'est-à-dire habituellement pendant la formation de la troisième feuille, la plante commence à souffrir, elle continue cependant à végéter à peu près aussi longtemps que les plantes normalement nourries : elle développe tous ses organes jusqu'aux fruits, mais

1. M. Kayser, chef du laboratoire des fermentations, dirigé par M. Duclaux à l'Institut agronomique, a donné un résumé de cette mémorable communication dans le tome XII des *Annales agronomiques*. Le mémoire, in extenso, traduit par M. J. Vesque, maître de conférences à la Faculté des sciences, a paru dans le tome XV du même recueil, sous les noms de MM. Hellriegel et Wilfarth.

sous une forme naine; en réalité, elle n'élabore pas de matière végétale, puisque chaque nouvel organe s'accroît aux dépens de la feuille la plus âgée, qui se vide et se dessèche.

Il semble donc que l'orge aussi bien que l'avoine ne puise son azote que dans les nitrates ajoutés au sol stérile; il en est tout autrement des légumineuses comme les pois; ces plantes acquièrent souvent un développement normal et parfois exubérant dans un sol entièrement privé d'azote combiné, et contrairement à ce qui arrive pour les graminées, l'augmentation ou la diminution de la proportion des nitrates distribués n'entraîne ni un accroissement, ni un amoindrissement régulier de la récolte.

Jusqu'ici les observations de MM. Hellriegel et Wilfarth ne font que confirmer sous une forme plus précise les anciennes observations de M. Georges Ville, mais nous touchons au point décisif de la belle découverte des agronomes allemands.

On prépare quarante-deux vases contenant 4000 gr. de sable, additionné de carbonate de chaux; on y ajoute une dissolution nutritive renfermant : phosphate de potasse, chlorure de potassium, sulfate de magnésie, on introduit dans chaque vase 2 graines de pois germées. Trente pots sont abandonnés à eux-mêmes, dix autres reçoivent 25 centigrammes de *délayure de terre;* dans deux enfin, le sable est, avant l'ensemencement, stérilisé au feu.

La délayure de terre est obtenue en mélangeant une

bonne terre arable, de préférence une terre ayant porté l'année précédente une culture de légumineuses, avec de l'eau, laissant reposer quelques instants, de façon à voir surnager au-dessus de la terre le liquide trouble ; c'est ce liquide, cette délayure de terre, qui est versée sur dix vases. L'expérience est commencée le 23 mai. Dans les deux premières semaines de juin, aucune différence entre les plantes, elles vivent toutes sur les réserves de la graine ; mais dès le 13 juin, toutes les plantes qui ont reçu la délayure de terre deviennent d'un beau vert. Dans les vases qui n'ont rien reçu, quelques pieds sont excellents, tandis que d'autres jaunissent comme ceux des pots stérilisés. Vers le milieu du mois, ces derniers périssent. Enfin, au moment de la récolte, aucun des vases qui a reçu la délayure de terre ne donne au-dessous de 16 grammes de récolte sèche, le maximum étant de 20 grammes, tandis que les vases sans délayure fournissent les récoltes les plus disparates, une très bonne, deux bonnes, deux passables, le reste médiocre ou même nul.

Les expériences répétées les années suivantes donnent des résultats semblables. Toujours la délayure de terre exalte la végétation du sainfoin, des lupins, des pois, tandis qu'elle n'exerce aucune action sur l'orge, l'avoine, le sarrazin, le colza, etc. Quelle est donc l'action qu'exerce cette délayure de terre? Que renferme-t-elle qui lui donne une si merveilleuse activité? Un être vivant, car si on la porte à l'ébullition pendant quelques minutes avant de la verser sur la terre, elle perd toute

vertu et n'agit pas plus sur les légumineuses que sur les autres espèces.

Cet être vivant, enfin, ne manifeste-t-il pas sa présence par quelques signes extérieurs? Si vraiment. Les botanistes, notamment M. Prilleux, inspecteur général de l'enseignement agricole, avaient observé depuis longtemps que, lorsqu'on déterre avec précaution les légumineuses, on voit les racines irrégulièrement couvertes de petites nodosités, de petits tubercules, de la grosseur d'une tête d'épingle. Écrase-t-on ces nodosités sur une lame de verre, de façon à examiner au microscope leur contenu, on le voit rempli de corpuscules allongés, souvent bifurqués, peu mobiles. Ce sont des bactéries.

Ce qui appartient en propre à MM. Hellriegel et Wilfarth, c'est la liaison entre l'emploi de la délayure de terre et l'apparition des nodosités: ces éminents observateurs ont parfaitement établi que si dans un sol ensemencé en pois, ou en lupins, on ajoute de la délayure après l'avoir chauffée, les plantes pâtissent et meurent, mais qu'aucune nodosité n'apparaît sur les racines. C'est donc à la présence de ces nodosités, à l'existence, dans ces petites protubérances, des microbes qui les peuplent, qu'il faut faire remonter la prospérité des légumineuses semées dans un sol dépourvu d'azote combiné. C'est à la présence, dans l'eau de lavage de la terre, des germes des bactéries productrices des nodosités, qu'il faut attribuer la fixation de l'azote libre.

Nous voici donc revenus à l'intervention des microorganismes dans la fixation de l'azote par les végétaux ; cette intervention a été encore démontrée par une expérience très élégante réalisée par M. E.Bréal, à mon laboratoire de physiologie végétale du Muséum d'histoire naturelle. Au lieu de déterminer l'apparition des nodosités sur les racines des légumineuses par l'apport de l'eau, enlevant au sol les germes qu'il renferme, M. Bréal choisit sur une racine une nodosité bien remplie, la pique avec une aiguille, puis, aussitôt, introduit cette aiguille dans le tissu d'une jeune racine de pois ou de lupin en germination depuis quelques jours. Il plante alors la graine adhérente à la racine piquée dans un sol stérile et à côté il sème une autre graine semblable dont la racine n'a pas reçu de piqûre. L'expérience est très curieuse : tandis que le lupin piqué s'accroît, fleurit, mûrit ses graines, et que ses racines se couvrent de nodosités peuplées de bactéries, le lupin non piqué végète misérablement et finit par périr. Dans le lupin piqué, l'azote surpasse de beaucoup celui que renfermait la graine dont il provient ; dans l'autre plante, on ne retrouve que l'azote contenu dans la graine.

La plante a été *inoculée*, et l'introduction, dans les tissus de la racine, des bactéries productrices de nodosités, détermine, en effet, leur apparition et la prospérité de la plante devenue capable d'utiliser l'azote atmosphérique.

Les germes de ces bactéries fixatrices d'azote paraissent très répandus dans le sol, et très habituellement,

quand, avec une bêche, on enlève doucement un pied de trèfle ou de luzerne, puis qu'on lave avec précaution les racines, on y distingue sans peine les nodosités distribuées irrégulièrement. M. Bréal les voit encore mieux en cultivant les pois dans l'eau de fontaine, simplement additionnée de petites quantités de chlorure de potassium et de phosphate de chaux, mais dans laquelle il écrase un tubercule recueilli sur la racine d'une luzerne; les pois qui fleurirent malgré les conditions anormales de la végétation portaient sur leurs racines des chapelets de tubercules, renfermant des bactéries analogues à celles qui avaient été ensemencées.

Ces connaissances nouvelles ont eu la sanction de la pratique; une terre tourbeuse de la rive gauche de l'Ems ne donnait que de très médiocres récoltes de légumineuses. On la saupoudre de quelques mètres cubes d'une terre fertile où ces plantes prospéraient, on sème. Partout où la terre fertile a été ajoutée, les pois sont luxuriants; partout où elle a fait défaut, ils restent chétifs. La terre fertile avait apporté les germes des bactéries productrices de nodosités.

Les faits acquis sont donc les suivants : les légumineuses prospèrent et s'enrichissent en azote quand elles portent sur leurs racines des nodosités peuplées de bactéries; ce sont ces bactéries qui sont l'intermédiaire nécessaire entre l'azote et la plante. La démonstration était éclatante, on ne pouvait nier plus longtemps que ces micro-organismes jouissent de la puissance singulière de triompher de l'inertie de l'azote, et non seule-

ment MM. Hellriegel et Wilfarth expliquaient les propriétés améliorantes des légumineuses, mais en outre ils apportaient aux idées de M. Berthelot un solide appui.

Il faut maintenant pénétrer un peu plus avant et chercher comment les bactéries s'introduisent dans les racines, comment surtout la légumineuse bénéficie de leur présence. Bien que ce sujet soit loin d'être complètement élucidé, on peut croire cependant, que les tubercules des racines sont des productions déterminées par l'action des bactéries, comme les galles, si communes sur les feuilles, naissent des piqûres des insectes; ces nodosités seraient utiles à la fois aux bactéries qui y pullulent et aux plantes sur lesquelles elles apparaissent. Les bactéries, trouvant dans le suc de la racine une nourriture appropriée à leurs besoins, peuvent s'y multiplier durant une infinité de générations et se répandre de nouveau dans le sol pendant la vie de la plante hospitalière, aussi bien qu'après sa mort. Quant à la plante elle-même, la bactérie lui fournit le moyen de se pourvoir d'un aliment extrêmement important, l'azote, qui est rarement dans le sol en quantité suffisante. La légumineuse profite mieux cependant que la bactérie, de cette sorte d'association, de symbiose. suivant l'expression consacrée. La légumineuse tire parti de la présence de la bactérie de la façon suivante. Dans la partie de la nodosité la plus voisine de la racine, apparaissent des cloisons qui retiennent les bactéries prisonnières. Après quelque temps, ces prisonnières

périssent, leurs tissus se dissolvent et sont utilisés par la plante. A la partie la plus jeune de la nodosité apparaissent constamment, au contraire, des cellules nouvelles, renfermant de l'amidon qui se solubilise et fournit aux jeunes bactéries les matériaux carbonés nécessaires à leur développement. La plante se prépare ainsi de nouveaux aliments : quand la bactérie aura utilisé l'azote atmosphérique et formé dans ses propres tissus des matériaux azotés, ceux-ci seront résorbés par la légumineuse, et portés jusque dans ses organes aériens par des séries de vaisseaux fibro-vasculaires. La structure anatomique du tubercule est ainsi admirablement adaptée aux conditions de cette vie commune.

Suffit-il, pour être convaincu que c'est bien l'azote atmosphérique qui intervient dans le développement des pois, des haricots, des lupins semés dans du sable additionné de délayure de terre ou vaccinés avec le liquide des nodosités, de constater que l'azote combiné contenu dans les récoltes surpasse de beaucoup l'azote de la graine? MM. Schlœsing fils et Laurent ne l'ont pas pensé.

Ces très habiles physiologistes ont résolu de mettre hors de doute cette intervention de l'azote atmosphérique, en faisant vivre des plantes dans une atmosphère limitée, mesurée avec une exactitude absolue, pour reconnaître si l'azote de cette atmosphère diminuerait du fait même de la végétation. Si cette diminution avait lieu, on devait retrouver l'azote libre disparu, engagé en combinaison dans le tissu même de la

plante. Les deux déterminations se contrôlaient ainsi l'une par l'autre.

L'expérience exigeait une rare dextérité. En effet, il ne suffisait pas de mesurer intégralement les gaz au début et à la fin de l'expérience, il fallait en outre alimenter les jeunes plantes d'acide carbonique aérien, en l'introduisant à mesure des besoins, dans les vases de végétation, il fallait encore extraire l'excès d'oxygène produit par la décomposition de cet acide carbonique; il fallait enfin savoir exactement quelle était la teneur en azote des graines semées, priver absolument le sable dans lequel elles devaient se développer de tout l'azote combiné qu'il pouvait renfermer, de façon à retrouver dans la récolte un poids d'azote combiné égal ou très voisin de celui de l'azote disparu de l'atmosphère. Malgré toutes ces difficultés, l'expérience réussit d'une façon complète; dans une des cultures l'azote gazeux disparu représentait 29 cent. cub. 1, pesant 0 gr, 0365, on trouva comme augmentation dans la récolte 0 gr, 0406; dans une autre l'azote gazeux disparu représentait 25 cent. cub. 9, pesant 0 gr, 0325, le gain de la récolte fut de 0 gr, 0341.

Enfin, comme dernier contrôle, on fit une troisième expérience dans laquelle les pois furent encore semés, mais sans qu'on ajoutât au sol qui les portait les germes provenant de quelques nodosités écrasées. Cette fois les bactéries fixatrices d'azote faisaient défaut, aucun gain ne se produisit. La fixation d'azote fut nulle, ou exactement elle fut de 0 gr, 0006; c'est-à-dire

bien inférieure à la limite des erreurs que l'on peut commettre dans de semblables recherches.

Quand l'Académie eut entendu la lecture de ce remarquable mémoire, elle s'associa complètement aux paroles de M. Berthelot, déclarant que ce travail met fin à la longue discussion dans laquelle on était engagé depuis des années, en établissant d'une façon définitive la fixation de l'azote atmosphérique par action microbienne.

§ V

Détermination spécifique des fixateurs d'azote.

Les légumineuses fixent l'azote de l'air dans leurs tissus quand leurs racines portent des nodosités à bactéries. Le fait est acquis. Les céréales, au contraire, ne paraissent utiliser que l'azote combiné des nitrates ou des sels ammoniacaux, cela découle de nombreuses expériences concordantes ; mais si nous plaçons ces deux familles aux extrémités d'une longue liste comprenant toutes les autres espèces végétales, ne trouverons-nous pas à quelques-unes d'entre elles des propriétés qui les rapprochent des légumineuses ? En d'autres termes, les légumineuses sont-elles les seules plantes susceptibles d'utiliser l'azote atmosphérique, ou bien cette faculté existe-t-elle encore dans d'autres familles ? Les anciennes expériences de M. George Ville semblaient montrer que d'autres plantes que les légumineuses

fixent l'azote de l'air, et tout récemment cette probabilité est devenue une certitude.

MM. Schlœsing fils et Laurent ont appliqué la remarquable méthode de recherche décrite plus haut, non seulement aux légumineuses, mais aussi à d'autres espèces ; dans une première série d'essais on fit croître dans les vases renfermant une atmosphère limitée, rigoureusement mesurée, des topinambours, de l'avoine, du tabac et des pois. Plusieurs vases semblables à ceux qui avaient été ensemencés ne portaient aucune végétation. Dans une seconde série d'essais, à l'avoine et aux pois s'ajoutèrent de la moutarde, du cresson, de la spergule. Dans la première série d'essais, une fixation d'azote libre se produisit dans presque tous les cas. Elle fut sensiblement plus forte quand la culture porta sur les pois que lorsqu'on mit en observation d'autres espèces ; mais dans six expériences sur sept, le volume de l'azote gazeux diminua, et l'analyse décela dans les produits obtenus plus d'azote combiné qu'il n'en avait été introduit par les semences.

L'une des expériences était particulièrement intéressante, le sol n'avait pas été ensemencé, et cependant la fixation de l'azote avait été sensible. Or il s'était développé à la surface de la terre une quantité notable de petites plantes vertes, tandis qu'il n'y en avait guère sur deux autres sols non ensemencés, et qui n'avaient accusé qu'une fixation d'azote, insignifiante dans un cas, nulle dans l'autre.

En soumettant à l'analyse la terre adhérente à la

croûte verte, on reconnut qu'elle renfermait en combinaison tout l'azote disparu ; il n'y en avait pas dans les couches plus profondes. En rapprochant ce résultat des essais dans lesquels on n'avait observé ni fixation d'azote, ni apparition d'algues vertes, on reconnaissait de plus que si une fixation d'azote avait eu lieu dans la culture de l'avoine et du tabac, le sol avait été dans ces deux cas couvert d'algues comme la terre nue. On était, dès lors, conduit à supposer que ces algues étaient l'agent de la fixation.

C'est pour vérifier cette hypothèse qu'on disposa une seconde série d'essais, dans laquelle on se débarrassa des algues, en couvrant le sol d'une couche de sable calciné, qui ne pouvait renfermer aucun germe ; grâce à cet artifice, aucune algue, aucune mousse n'apparut, et l'expérience devint d'une parfaite netteté. La fixation de l'azote ne fut sensible que pour les pois, elle resta dans la limite des erreurs d'expérience pour les autres espèces.

Ces nouvelles recherches de MM. Schlœsing et fils Laurent étendent donc à une nouvelle classe d'êtres vivants, aux mousses, aux algues vertes, la propriété de fixer l'azote atmosphérique; ces travaux donnent, en outre, quelque lumière sur d'autres points restés jusqu'à présent fort obscurs.

Dans les nombreuses expériences qu'il a exécutées sur d'autres espèces que les légumineuses, M. George Ville avait observé des fixations d'azote notables. Souvent les essais de vérification ont échoué, sans qu'on

pût pénétrer la raison des échecs ou des succès ; il est possible aujourd'hui de risquer une hypothèse qui expliquerait ces anomalies. Quand, dans les laboratoires, on conserve pendant quelque temps les dissolutions complexes renfermant des nitrates, des phosphates, des sels de potasse, employées pour soutenir la végétation dans les sols stériles, on y voit très souvent apparaître des algues. Or, les expériences dans lesquelles M. George Ville a constaté des gains d'azote ont porté sur des plantes qui ont reçu au début de la végétation de petites quantités de nitrate, et rien n'empêche de supposer que les sols ainsi enrichis ont été envahis par ces cryptogames fixateurs d'azote, qui abandonnant au sol leur dépouille, ont permis à la plante en expériences d'acquérir une dose d'azote supérieure à celle qu'on avait ostensiblement fournie.

L'azote atmosphérique ne serait ainsi entraîné dans les plantes à organisation complexe qu'après avoir été soustrait à l'air par les végétaux cryptogames. C'est peut-être ainsi qu'il faut expliquer encore les quantités d'azote considérables que l'analyse décèle dans les prairies de graminées. Les diverses espèces de cette nombreuse famille paraissent incapables d'utiliser à leur profit l'azote de l'air, et on ne comprenait pas comment les terres maintenues en prairie s'enrichissent constamment d'azote, avant d'avoir remarqué que ces sols sont envahis par des mousses, des algues variées, auxquelles il faut sans doute rapporter les gains constatés.

Jusqu'à présent aucune expérience précise ne permet

d'affirmer que quelques familles de plantes phanérogames autres que les légumineuses utilisent l'azote atmosphérique, mais la discussion des expériences exige une attention particulière, car les résultats semblent, au premier abord, conduire à une conclusion opposée à celle que nous venons de formuler.

A la fin de l'année 1891, M. Bréal sema, dans de grands pots à fleurs pouvant contenir 3 kilos de sable, des graines de cresson alénois déjà germées ; le sable n'avait pas été calciné, mais seulement lavé à plusieurs reprises et il ne renfermait que des traces de matières organiques. On ajouta des engrais minéraux, sans aucun engrais azoté ; pendant l'hiver, bien que les vases fussent placés dans une serre, la végétation fut languissante, elle ne prit son essor qu'au printemps. Quand on mit fin à l'expérience, le cresson était luxuriant. Quelques pieds avaient $0^{m},95$ de hauteur, ils avaient mûri leurs graines ; en ne tenant compte que de la partie aérienne, on trouvait déjà que l'azote de la récolte dépassait beaucoup celui des graines et de l'eau d'arrosage. Quand on examina les racines, on trouva qu'elles avaient pris un prodigieux développement, elles enlaçaient le sable, formaient un véritable feutre ; on trouva que le sol s'était aussi singulièrement enrichi d'azote.

Cette expérience fut recommencée, mais le semis eut lieu dans des vases de moindre dimension, renfermant du sable normal ou stérilisé ; dans l'un et l'autre cas, on échoua complètement. Les plantes furent chétives,

comme celles qu'obtenait M. Boussingault, dans les expériences où il ne constatait aucun gain d'azote. En recommençant encore, mais cette fois, en ensemençant le cresson dans des vases d'une grande capacité, on constata, comme dans le premier essai, un gain d'azote sensible ; en Allemagne, le professeur Frank obtint des résultats analogues. Doit-on en conclure que le cresson de M. Bréal ou les plantes variées de M. Frank ont fixé directement l'azote atmosphérique ? Il serait imprudent de l'affirmer. Il semble plus vraisemblable que ces expériences ne sont qu'une vérification de la découverte de M. Berthelot ; ce sont sans doute les organismes contenus dans le sable qui ont fixé l'azote dont les plantes se sont ensuite emparées. On est d'autant plus porté à le croire que M. Berthelot, continuant des recherches sur les micro-organismes fixateurs d'azote, a réussi à en isoler quelques-uns ; et qu'en outre, plus récemment, un physiologiste russe, dont le nom a acquis dans ces dernières années une juste célébrité, M. Winogradsky, a cultivé avec succès quelques-unes de ces espèces.

Quand, ainsi que nous l'avons fait, il y a une quinzaine d'années, M. Maquenne et moi, on place dans un grand ballon de verre une dissolution de sucre, un peu de phosphate d'ammoniaque, de la craie en poudre, et enfin une poignée de terre, puis qu'on maintient le tout à une température de 30° environ ; on voit se produire une fermentation très énergique, avec dégagement d'hydrogène et d'acide carbonique et formation d'aci-

des butyrique et acétique, les ferments qui entrent en jeu sont nombreux, parmi eux se trouve le ferment fixateur d'azote que M. Winogradsky a réussi à isoler. — Ce ferment n'agit qu'à l'abri de l'air; si on l'emploie seul dans un liquide en couche mince, par suite bien aéré, la fixation d'azote n'a pas lieu, mais elle se produit, quand au microbe fixateur d'azote, se joignent des bactéries vulgaires, capables de saisir l'oxygène atmosphérique pour le transformer en acide carbonique et former ainsi autour du microbe anaérobie un milieu favorable. Dans une des expériences de M. Winogradsky, portant sur un liquide sucré, on a constaté la fixation de 24 et de 28 milligrammes d'azote. On remarquera, suivant la très judicieuse observation de M. Berthelot, que cette fixation d'azote est corrélative de la destruction des matières hydrocarbonées, produites par les végétaux à chlorophylle. Les fixateurs de carbone et les fixateurs d'azote jouent ainsi un rôle complémentaire; les plantes à chlorophylle saisissent l'acide carbonique aérien, le réduisent, en forment des matières combustibles que brûlent les microbes fixateurs d'azote, en produisant de l'acide carbonique et de l'hydrogène qui vraisemblablement entre en combinaison avec l'azote dans les cellules de ces êtres microscopiques.

Faut-il s'excuser d'avoir si longuement, si minutieusement analysé les travaux récents qui établissent avec certitude l'intervention de l'azote atmosphérique dans les phénomènes de la végétation ? Pour le penser, il ne faudrait pas voir que cette fixation, dans le sol du gaz

dont l'atmosphère nous offre un réservoir inépuisable est la condition même de la persistance de la vie à la surface du globe.

La matière ne se détruit pas ; elle ne se crée pas, elle revêt seulement des formes variées qui n'affectent ni la nature intime, ni le poids des éléments dont elle est formée. L'azote circule d'un être à l'autre. Engagé aujourd'hui dans une combinaison complexe, constituant les muscles d'un animal, demain détritus soumis à l'action des micro-organismes, il devient ammoniaque, puis acide azotique, il pénètre alors dans le végétal, et le voilà gluten du blé, prêt à reprendre ses éternelles migrations. S'il ne s'altère, ni ne se détruit dans ces longs voyages, il peut cependant disparaître pour de nombreuses années de la circulation. Les nitrates solubles dans l'eau sont entraînés à la mer, y deviennent ammoniaque, et si on se rappelle que chaque litre d'eau de mer renferme $0^{gr},0004$ d'ammoniaque, on voit quelle est l'immense quantité d'azote combiné que renferme l'océan ; or de faibles fractions de cet azote reviennent seules au sol qui les a fournies. L'océan nous fournit un peu de poisson ; aux riverains, des fucus, des varechs qui servent à la fumure des terres du littoral et y déterminent une végétation luxuriante depuis longtemps célèbre : la ceinture dorée de la Bretagne n'a pas d'autre origine ; mais la disproportion entre l'azote combiné porté à l'océan et la quantité rendue est excessive, et la terre serait dépourvue depuis longtemps d'azote combiné, si l'atmosphère ne compensait partiellement

les pertes que supporte constamment le sol cultivé.

Ces pertes croissent à mesure que les exigences de l'hygiène sont plus étroites; jamais l'ensemble de nos populations ne supportera les gènes que s'imposent les habitants de nos départements du Nord, de l'Alsace ou de la Provence, et n'emploieront sans transformation les résidus de la vie que rejettent les grandes villes, comme le font les Chinois. Grâce à cette habitude, singulièrement désagréable, il faut le reconnaître, ils ont pu continuer à croître, à prospérer depuis des milliers d'années, tandis que les grands empires asiatiques, peuplés de cultivateurs imprévoyants, se sont abîmés peu à peu par l'impossibilité de vivre dans des pays épuisés par une culture malhabile.

Notre habitude de ne pas utiliser les résidus de la vie, mais de les rejeter à la mer, comme on le fait à Londres, ou à la Seine, comme on le fait à Paris, nous force à vivre sur de maigres réserves qui auront disparu dans un nombre d'années restreint. Aujourd'hui, notre culture épuise le nitrate de soude que péniblement une flotte entière va chercher dans le désert d'Atacama, sur la côte américaine du Pacifique, dont les îlots, pendant une cinquantaine d'années, nous ont fourni du guano, aujourd'hui presque disparu. Nous employons encore le sulfate d'ammoniaque obtenu par la purification du gaz d'éclairage de la houille; nous faisons rentrer ainsi dans la circulation active l'azote qui a été fixé aux époques reculées, où la végétation puissante et monotone de la terre accumulait ces réservoirs de chaleur et de

force que nous utilisons aujourd'hui. Mais l'azote du nitrate de soude du Pérou, du sulfate d'ammoniaque de la houille ou des matières excrémentitielles, est bien loin de compenser celui qui est constamment perdu, et si on pouvait calculer d'une part l'azote combiné enfoui chaque année dans les profondeurs de l'Océan et celui que nous exhumons des gisements exploités, on trouverait une terrible différence.

Malgré ces déperditions formidables, à chaque printemps, nos prairies donnent de l'herbe, nos forêts reverdissent sans que nous ayons à intervenir, leur vie est alimentée par l'azote atmosphérique dont nous commençons à comprendre le mode d'action.

Quand, il y a trente ans, M. Pasteur nous a fait comprendre le rôle des micro-organismes, il nous les a présentés comme les agents nécessaires de la réduction de la matière organique aux formes simples sous lesquelles ses éléments rentrent dans la circulation générale : « Si les êtres microscopiques, disait-il, disparaissaient de notre globe, la surface de la terre serait encombrée de matière organique morte et de cadavres de tout genre (animaux et végétaux). Ce sont eux principalement qui donnent à l'oxygène ses propriétés comburantes ; sans eux, la vie deviendrait impossible parce que l'œuvre de la mort serait incomplète. »

Depuis 1862, la justesse des idées de M. Pasteur a été démontrée par d'innombrables recherches, mais la science ne s'arrête pas, et aujourd'hui apparaît une

fonction nouvelle de ces micro-organismes. Non seulement ils travaillent à rendre assimilable par les végétaux supérieurs la matière organique en la réduisant aux formes simples : eau, acide carbonique, ammoniaque, acide azotique, sous lesquelles ils peuvent en utiliser les éléments ; mais, en outre, associés à certaines espèces végétales privilégiées, ils leur préparent, ils leur façonnent l'aliment le plus précieux, la matière azotée. qu'ils élaborent à l'aide de l'azote de l'air, ou encore, isolés dans les profondeurs ou à la surface des sols vierges, ils élaborent la matière organique la plus complexe, la matière azotée, en faisant pénétrer dans le cycle de la vie l'élément le plus difficile à entraîner : l'azote. Les êtres élémentaires, suivant l'excellente expression de M. Berthelot, provoquent ainsi des synthèses véritables.

Sans doute, leur histoire est encore fort obscure. Comment l'azote est-il engagé en combinaison ? Quelles sont les réactions qui déterminent la fixation de ce gaz inerte ? Nous n'émettons encore sur ce sujet que des hypothèses. Quoi qu'il en soit, les points suivants sont acquis : la fixation de l'azote atmosphérique dans la terre végétale assure la perpétuité de la vie à la surface du globe, cette fixation a lieu sous l'influence des ferments de la terre.

CHAPITRE II

UTILISATION DE L'AZOTE DU SOL

Quand on examine les comptes de culture d'une grande ferme de la région septentrionale de notre pays, là où la betterave couvre de larges surfaces, on voit que les dépenses d'engrais sont considérables. Si l'acquisition des superphosphates en forme une part, une autre et beaucoup plus grande provient de l'achat des engrais azotés : sulfate d'ammoniaque et surtout nitrate de soude.

Et, en effet, malgré les apports de fumier que produisent les étables où, pendant tout l'hiver, les animaux consomment les pulpes des sucreries, la terre ne donne de copieuses récoltes qu'à la condition de recevoir ces engrais complémentaires. Est-ce donc que cette terre qui exige cet apport de matières fertilisantes ne renferme pas de matières azotées ?

Bien au contraire. Une terre cultivée de moyenne fertilité accuse, à l'analyse, par kilo, 1 gramme d'azote combiné ; dans les terres riches, la teneur en azote, par kilo, monte à 2 grammes ; elle s'élève encore plus haut dans les prairies ; or, si on admet que les racines

des plantes annuelles s'enfoncent jusqu'à une profondeur de 35 centimètres, ce qui est bien au-dessous de la vérité, on trouve, pour le poids de la terre qui couvre les 10 000 mètres carrés d'un hectare, 4 000 tonnes de 1 000 kilos; si enfin la terre renferme 1 millième d'azote combiné, un hectare en contiendra 4 000 kilos, et 8 000 si l'analyse avait décelé 2 millièmes. Une bonne récolte de betteraves ou de froment exige de 100 à 120 kilos d'azote, et la disproportion entre le stock de matières azotées du sol et les exigences des récoltes est telle qu'on est stupéfait de voir qu'elles ne deviennent abondantes que lorsqu'on ajoute à cette énorme quantité d'azote les faibles proportions que renferment les 200 ou 300 kilos de nitrate de soude que les cultivateurs répandent au printemps sur chaque hectare de betteraves.

§ I

Nécessité des engrais azotés. — Réfutation de la théorie minérale de Liebig. — Sirs J. B. Lawes et H. Gilbert. — Boussingault.

Cette contradiction : nécessité d'ajouter des engrais azotés sur des sols déjà très riches en azote, a été l'occasion d'une grosse querelle qui a divisé les agronomes, il y a une cinquantaine d'années.

La découverte de la haute teneur en azote combiné des sols cultivés est due à Liebig ; elle arriva au moment

où Boussingault et Payen, en France, essayaient de calculer la valeur des engrais d'après leur teneur en azote. Liebig attaqua vivement ce mode d'appréciation; son raisonnement était spécieux : « Une tonne de fumier, disait-il, renferme 5 kilos d'azote; l'épandage de 30 tonnes de fumier constitue une bonne fumure; c'est donc 150 kilos que vous apportez ; quelle utilité peut-il y avoir à distribuer 150 kilos d'azote à un sol qui en renferme de 4 000 à 8 000? MM. Boussingault et Payen sont dans l'erreur, ce n'est pas l'azote qu'il renferme qui donne au fumier sa valeur; le fumier n'est utile que par les matières minérales : acide phosphorique et potasse, qui y sont contenues. »

La question était nettement posée, elle pouvait être résolue par l'expérience. Dès 1844, sirs J. B. Lawes et Henry Gilbert s'engagèrent, à Rothamsted, dans cette longue série d'essais qu'ils continuent encore aujourd'hui. Des parcelles de terre, bien homogènes, furent ensemencées de mêmes espèces végétales, les unes reçurent seulement des engrais minéraux : superphosphate de chaux, chlorure de potassium, sulfate de magnésie ; sur les autres on ajouta à ces sels du sulfate d'ammoniaque; les récoltes furent absolument différentes; l'influence de l'engrais azoté décisive; les rendements des parcelles qui l'avaient reçu doubles ou triples de ceux des terres qui en avaient été privées.

M. Boussingault, de son côté, donna à l'expérience qu'il imagina pour combattre la théorie de Liebig une forme piquante qui lui assura une grande popularité.

« Si, disait-il dans son cours du Conservatoire des arts et métiers, il faut en croire M. J. de Liebig, si les parties minérales des engrais sont seules utiles, nous sommes, il faut en convenir, nous autres cultivateurs, de bien grands maladroits. Depuis des centaines d'années nous transportons péniblement nos fumiers de la ferme aux champs, nos attelages nous coûtent cher; faisons mieux : brûlons nos fumiers; nous aurons ainsi une toute petite quantité de cendres et, pour le transport, une brouette fera l'affaire. »

L'essai fut disposé sur deux parcelles égales d'une terre appauvrie par la culture. On porta sur l'une les cendres obtenues de 500 kilos de fumier et on sema de l'avoine; sur la seconde parcelle, on enterra 500 kilos du même fumier, on ensemença d'une même quantité de graine, puis on attendit la récolte. Dans le champ qui avait reçu le fumier, 1 de graine rendit 14, dans le champ amendé avec les cendres, un de graine donna 4.

Liebig, au reste, n'avait pu formuler sa *théorie* minérale que dans l'ignorance où il était de la teneur en acide phosphorique et en potasse de la majeure partie de nos terres cultivées. S'il avait su, comme nous le savons aujourd'hui, qu'elles ne renferment pas moins d'acide phosphorique et de potasse que d'azote, il aurait reculé. Si, en effet, la grande quantité d'azote combiné contenue dans le sol enlève toute utilité aux engrais azotés, le raisonnement s'applique à l'acide phosphorique et à la potasse; il faut s'abstenir de les employer, puisque, dans presque toutes les terres,

l'analyse décèle leur présence. On arrive ainsi à cette conclusion inadmissible : les engrais sont inutiles.

Si l'expérience condamne l'hypothèse de Liebig, elle ne résout pas ce paradoxe : il est avantageux d'ajouter des engrais azotés à un sol riche en azote... Est-ce donc que cet azote combiné contenu dans le sol est inerte, inutile, sans action sur les végétaux?

Une très faible fraction de cet azote est engagée, en effet, dans des combinaisons assimilables; Boussingault en a donné une preuve décisive dans une expérience où, suivant sa spirituelle expression, il a voulu joindre à l'opinion des savants sur la matière azotée du sol « l'opinion des plantes ».

On forme un sol artificiel avec des cailloux, du sable et un peu de bonne terre renfermant assez d'azote pour alimenter une petite plante, si cet azote est assimilable. On sème; la graine germe, la plante se développe... aussi faible, aussi chétive que si on n'avait pas ajouté la bonne terre; l'azote qu'elle renfermait n'a pas été utilisé.

A quel état est donc cet azote? Dans quelle combinaison est-il donc engagé? Ne pouvons-nous vaincre son inertie? N'est-il aucun moyen de tirer parti des richesses accumulées que renferment nos sols cultivés? Telles sont les questions que nous allons examiner.

§ II

Origine et composition de l'humus.

Les terres meubles dans lesquelles les végétaux enfoncent leurs racines sont habituellement formées de quatre matières différentes : de menus fragments de roches; de sable; d'une matière plastique : l'argile, silicate d'alumine provenant de la décomposition des silicates qui constituent les roches primitives ou les roches éruptives; de calcaire, et enfin, d'une matière noire très peu soluble dans l'eau, mais attaquable par l'action successive des acides et des bases : l'humus; c'est dans cet humus que se trouve l'azote, engagé en combinaison avec du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène.

L'humus est le résidu de la décomposition des matières végétales, soit par des insectes, soit par les cryptogames. L'illustre Charles Darwin a insisté, il y a plusieurs années déjà, sur le rôle très curieux que remplissent, dans la formation de l'humus, les vers de terre, les lombrics : ils attirent, dans les galeries qu'ils creusent dans le sol, les feuilles mortes qui gisent à la surface et rejettent des matières noires mélangées d'une grande quantité de terre. Le savant naturaliste anglais cite une expérience curieuse, facile à reproduire, exécutée par M. Von Heusen : deux vers de terre furent placés dans un vase de 45 centi-

mètres de diamètre, remplis de sable, sur lequel on étendit des feuilles sèches; celles-ci furent successivement entraînées dans les trous et, après six semaines, une couche de sable d'une épaisseur d'un centimètre était convertie en humus après avoir passé par les organes digestifs des deux vers.

Cette transformation de la matière végétale en substance noire, légèrement soluble dans les alcalis, paraît être avantageuse aux plantes qui se succèdent à la surface du sol. Un fonctionnaire anglais, qui a longtemps séjourné en Guinée, assure que les nègres cultivent de préférence les terres qui ont été ainsi remuées, triturées par les vers et qui sont couvertes de leurs déjections.

Bien plus énergique encore est l'action des micro-organismes, champignons, bactéries, ferments de toutes sortes, qui pullulent dans le sol et y assurent la destruction de toute la matière organique accumulée par les végétations qui s'y succèdent chaque année. Cette destruction est leur œuvre. Si on les fait périr en élevant la température d'un lot de terre jusqu'à 120 degrés pendant plusieurs heures, toute transformation cesse; la terre n'exhale plus l'acide carbonique, ainsi qu'elle le fait constamment dans les conditions normales.

On sait, en effet, depuis les admirables travaux de M. Pasteur, que l'intervention des micro-organismes est nécessaire à la transformation de la matière organique; que les liquides les plus altérables, même le

lait, n'éprouvent plus aucune modification, si, en élevant sa température au delà de 100 degrés, on tue tous les ferments qu'il renferme. Le lait *pasteurisé*, l'expression est aujourd'hui usuelle, le lait qui a été débarrassé de tous les micro-organismes qui métamorphosent si rapidement ses éléments, peut être indéfiniment conservé. Une industrie se crée aujourd'hui pour substituer le lait conservé au lait frais.

Les micro-organismes attaquent les débris végétaux avec d'autant plus d'énergie que l'air a plus facilement accès dans la masse; quand l'air fait défaut, la décomposition devient très lente. Cette notion est mise à profit par les cultivateurs qui *ensilent* leurs fourrages pour assurer pendant l'hiver une nourriture fraîche aux animaux. Le maïs qui, sous le climat de Paris, ne mûrit pas sa graine, est employé comme fourrage; sec, il devient dur et les animaux ont peine à le consommer. Dans les climats humides, les secondes coupes des prairies naturelles ou artificielles sont difficiles à sécher; souvent une averse intempestive arrive sur le foin prêt à être bottelé, il faut l'étendre de nouveau, car s'il est rentré humide, les champignons entrent en jeu, il moisit et n'a plus de valeur. On tourne ces difficultés en accumulant les herbes, le maïs vert, dans un silo maçonné, on le couvre de madriers, on les charge de façon à former une masse compacte; la respiration des végétaux consomme bientôt tout l'oxygène emprisonné entre les assises de fourrages, il est remplacé par de l'acide carbonique et, dès lors, les destructeurs

les plus actifs disparaissent du centre, ils ne travaillent que sur le pourtour, là où péniblement l'air se fraie un passage. Quand on examine un silo entamé, on voit très bien l'influence de l'air sur la destruction de la matière végétale; à la partie supérieure, on trouve une zone déjà moisie, profondément altérée, puis une couche de quelques centimètres d'épaisseur toute tapissée de blanches ramifications des champignons; la température en est assez élevée pour être sensible à la main, la combustion y est active; au-dessous, là où l'air n'a pu s'infiltrer, le fourrage est intact.

Les débris végétaux ainsi attaqués par les cryptogames renferment des matières de trois ordres, des substances formées de carbone, puis d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions de l'eau : les hydrates de carbone des chimistes, l'amidon, la cellulose, la gomme, appartiennent à ce premier groupe ; des substances beaucoup plus chargées de carbone que les précédentes, constituant particulièrement les vaisseaux, et désignées sous le nom de vasculoses; enfin des matières azotées. Le sort de ces trois ordres de substances est très différent, les hydrates de carbone sont complètement brûlés ; les champignons s'en nourrissent, exhalent par leur respiration tout le carbone à l'état d'acide carbonique. Les matières azotées sont également la proie des cryptogames qui en constituent leurs propres tissus ; la vasculose persiste plus ou moins altérée. C'est son mélange avec les débris de champignons, qui meurent quand les aliments leur font défaut, qui constitue l'humus.

Il est beaucoup plus riche en azote que ne l'étaient les débris végétaux eux-mêmes, car toute la fraction de ces débris, constituée par les hydrates de carbone, a disparu; l'azote des albuminoïdes des végétaux se trouve donc disséminé dans une matière réduite, et sa proportion centésimale a augmenté; c'est ce qu'a très bien observé récemment M. Kostytchef, dans ses travaux sur le *tchernoziem*, sur les terres noires du sud de la Russie: dans lesquelles l'humus est tellement abondant que depuis un temps immémorial ces terres donnent des récoltes de seigle et de blé, médiocres il est vrai, mais continues, sans recevoir d'engrais.

Ces débris des végétations antérieures, à des états de décomposition plus ou moins avancée, suivant que leur attaque par les cryptogames a été plus ou moins complète, les débris de ces cryptogames eux-mêmes, les cadavres des micro-organismes fixateurs d'azote, forment la matière organique du sol; c'est là que gisent ces 4000 ou 8000 kilos d'azote que l'analyse décèle dans un hectare de terre, c'est là que puise la végétation spontanée, c'est dans cette masse que s'alimentent les maigres récoltes obtenues sans le secours d'aucun engrais.

L'humus ne persiste dans le sol, ne s'accumule parfois, en quantité énorme, comme dans les prairies humides, que parce qu'il est peu altérable. C'est une matière première qui lentement se transforme en substances propres à l'alimentation végétale, et c'est précisément parce que cette transformation est lente que l'emploi des engrais azotés est nécessaire, qu'il

nous faut ajouter à nos sols riches en azote : du sulfate d'ammoniaque ou du nitrate de soude.

Les nécessités des semailles et des récoltes nous forcent d'accumuler sur le même sol un grand nombre d'individus de la même espèce végétale ; semés le même jour, ils atteignent ensemble chacune des phases de leur développement ; tous ont, à la fois, les mêmes exigences ; or les transformations de l'humus ne sont pas assez rapides, ne se produisent pas assez complètement en temps opportun, pour suffire à ces exigences, et nous sommes obligés pour les satisfaire d'acquérir des engrais azotés. Ils ne sont nécessaires que parce que nous ne savons pas amener au printemps et au commencement de l'été l'azote de l'humus à prendre les formes sous lesquelles il est assimilé, utilisé par les végétaux ; ces transformations se produisent sous l'influence des ferments du sol. Il nous faut donc connaître, d'une part, les formes sous lesquelles les plantes assimilent l'azote, et de l'autre, suivre l'action des ferments travaillant sur l'humus et rendant solubles, assimilables, les éléments qu'il renferme.

§ III

Alimentation azotée des graminées et des légumineuses.

S'il existe des végétaux de grande culture, notamment tout le grand groupe des céréales, qui acquièrent un

développement complet quand ils sont enracinés dans des sols pauvres en matières organiques, mais amplement fournis d'aliments minéraux, de nitrates ou de sels ammoniacaux, il en est d'autres qui ne paraissent prospérer que lorsque leurs racines rencontrent certaines matières organiques assimilables, dérivées de l'humus, matières complexes, difficiles à étudier et encore mal définies.

Sans parler des plantes à terre de bruyère, qui font l'ornement de nos jardins, en laissant de côté les azalées, les rhododendrons, les hortensias, etc., pour nous restreindre aux végétaux exploités par les cultivateurs, nous trouvons une profonde différence d'alimentation entre les céréales et les légumineuses.

On sait depuis longtemps qu'il est impossible de maintenir le trèfle, la luzerne ou le sainfoin indéfiniment sur le même sol comme on y maintient du blé, de l'avoine ou de l'orge ; à cette notion courante parmi les cultivateurs, sirs J.-B. Lawes et H. Gilbert ont ajouté à Rothamsted une démonstration éclatante. Tandis que depuis cinquante ans (la première récolte date en effet de 1844), ils sèment, sur le même champ, du blé et que les parcelles qui reçoivent des engrais salins : nitrate ou sels ammoniacaux, superphosphates et sels de potasse, donnent des récoltes aussi abondantes, même un peu supérieures à celles qu'on obtient des parcelles qui reçoivent du fumier de ferme, c'est-à-dire à la fois des aliments minéraux et un ample approvisionnement de matières humiques, tous les essais de

culture continue du trèfle ont échoué, aussi bien sur les terres sans engrais que sur celles qui reçoivent des engrais chimiques, que sur celles qui ont été additionnées de fumier. Quand on sème du trèfle sur ces sols déjà fatigués par les cultures antérieures de cette même plante, il germe, puis dépérit, et à sa place apparaissent des graminées variées, végétant avec d'autant plus de vigueur que les engrais ont été plus copieusement distribués.

A Rothamsted, un seul essai de culture continue du trèfle a réussi, dans une toute petite plate-bande du jardin voisin de la maison de sir J.-B. Lawes.

Quelle différence existe-t-il entre cette plate-bande et les champs voisins ? C'est que la terre du jardin a reçu pendant une nombreuse suite d'années ces abondantes fumures de fumier de ferme que prodiguent les jardiniers, et que peu à peu ce fumier a subi les métamorphoses qui l'ont amené à un état tel, que sa matière organique azotée soit devenue assimilable par le trèfle. Ce n'est donc pas le fumier frais qui convient. C'est un produit intermédiaire entre la matière humique contenue dans le fumier et les sels ammonicanx ou les nitrates qui en proviennent par des dégradations successives.

J'ai exécuté moi-même sur ce sujet quelques expériences que je crois devoir rapporter ; au moment où j'ai tracé en 1875 le champ d'expériences de Grignon, j'ai consacré quelques parcelles à la culture sans engrais. Il y a cinq ou six ans, leur épuisement était

sensible, les récoltes de betteraves y devenaient misérables et celles du trèfle très faibles ; on essaya en vain de les rétablir avec des engrais minéraux, et quand on analysa ces terres pour reconnaître quels éléments y faisaient défaut, on reconnut que la proportion d'humus avait beaucoup baissé, la matière organique avait aussi changé de nature. Les eaux de drainage qui s'écoulent de ces terres épuisées sont absolument incolores, celles qu'on recueille des terres en bon état présentent au contraire une légère teinte ambrée, due à la dissolution d'une combinaison de la matière organique avec la chaux. — Cette dissolution est très efficace, et les jeunes plantes qui la reçoivent en éprouvent une influence heureuse.

Pour mieux montrer, au reste, que les graminées et les légumineuses ne prennent pas dans le sol les mêmes aliments, que la matière organique, indifférente aux premières, est nécessaire aux secondes, j'ai rempli de grands vases, d'une capacité de 50 litres, de terres épuisées par la culture sans engrais. Les unes ont été ensemencées de *ray-grass*, la graminée du gazon, les autres de trèfle. Dans les deux séries, quelques pots ont reçu des engrais chimiques, d'autres la matière humique, dissoute, qu'on extrait facilement du fumier de ferme, d'autres enfin restèrent sans engrais. Les résultats furent très curieux, le *ray-grass* fut luxuriant dans la terre enrichie d'engrais chimiques, et médiocre quand il poussa dans la terre amendée avec la matière humique, bien qu'on eût soin d'égaliser les quantités

d'azote, d'acide phosphorique et de potasse introduites. Pour le trèfle, les résultats furent tout différents ; la fumure aux engrais chimiques n'exerça qu'une très faible influence, tandis que la terre qui avait reçu la matière humique porta une excellente récolte.

Tous ces faits militent dans le même sens. La matière humique azotée du sol, la matière noire du fumier, soluble dans les carbonates alcalins, est un aliment pour certaines espèces, notamment pour les légumineuses, quand, soumise pendant quelque temps à l'action de l'air et des ferments de la terre, elle a pris une forme que nous sommes encore incapables de définir nettement ; mais, en revanche, pour la plupart des autres, elle n'est qu'une matière première qui ne deviendra assimilable qu'après avoir subi des métamorphoses plus complètes, après que son azote aura été amené soit à l'état d'ammoniaque, soit à celui d'acide azotique.

§ IV

Transformation de l'humus. — Production de l'ammoniaque.

Ces métamorphoses se produisent sous l'influence de ferments contenus dans le sol. On fait deux lots de terre, on procède à leur analyse, on y dose : l'ammoniaque, c'est-à-dire cette combinaison mal odorante formée d'hydrogène et d'azote, qui est le dernier terme des

métamorphoses des matières animales, quand elles se putréfient à l'abri de l'air ; puis on *stérilise* l'un des lots de terre, en le portant à une température de 120 degrés environ pendant plusieurs heures, on laisse l'autre lot à la température ordinaire, on tasse bien la terre, on la maintient très humide de façon que l'air y pénètre difficilement et que l'ammoniaque ne se détruise pas en s'oxydant à mesure qu'elle apparaît. Dans les lots de terre ainsi préparés, on détermine à diverses époques l'ammoniaque formée, et on trouve qu'après un mois, six mois, deux ans, la proportion d'ammoniaque n'a pas changé dans la terre stérilisée, tandis qu'elle a au contraire notablement augmenté dans le sol qui n'a pas été soumis à une température suffisante pour tuer les germes des ferments qu'il renferme.

MM. Muntz et Coudom, qui ont établi récemment ces faits avec précision, ont reconnu que les êtres vivants qui transforment la matière organique azotée en ammoniaque sont nombreux ; tandis que la plupart des transformations déterminées par l'activité des micro-organismes sont étroitement liées à la présence d'une espèce microbienne particulière, absolument spécialisée dans la production de certaines substances, d'autres métamorphoses sont au contraire provoquées par plusieurs espèces différentes. La production de l'ammoniaque est ainsi une fonction banale qui appartient à des organismes variés.

Le mécanisme de cette transformation nous échappe

encore. L'humus de la terre très riche en carbone est constamment soumis à des actions oxydantes ; sa molécule complexe se dégrade peu à peu en perdant du carbone qui apparaît dans l'atmosphère du sol sous forme d'acide carbonique, et quand on dose simultanément dans un sol resté longtemps sans fumier le carbone et l'azote, on trouve que le poids du carbone n'est plus guère que quatre fois celui de l'azote, tandis qu'il est huit ou neuf fois plus fort dans des sols fumés régulièrement. Comment lès micro-organismes réduisent-ils à l'état d'ammoniaque cette molécule déjà très riche en azote? c'est ce qui jusqu'à présent n'est pas éclairci. Si le détail nous est inconnu, le fait lui-même est de la plus haute importance. Quand la matière azotée complexe qui a fait partie intégrante d'un végétal s'est réduite à l'état d'humus, puis qu'enfin son azote apparaît sous forme d'ammoniaque, quand un tissu animal se décompose en produits putrides parmi lesquels domine encore l'ammoniaque, l'azote est arrivé à une de ces étapes où brusquement son éternel voyage change de direction.

Jamais les belles expressions de M. Pasteur, sur le rôle des micro-organismes dans les transformations de la matière, ne s'appliquent plus justement qu'à la métamorphose des matières azotées complexes en ammoniaque; nous ne saurions trop le répéter, c'est par l'action des ferments que la matière morte reprend la forme sous laquelle elle va de nouveau pénétrer dans les êtres vivants : « Sans ces micro-organismes, la

continuité de la vie serait impossible, car l'œuvre de la mort serait incomplète. »

C'est qu'en effet, une fois que l'humus dégage son azote à l'état d'ammoniaque, celui-ci est assimilé, entraîné dans les tissus de la plante où il se rétablit à l'état de matière organique complexe.

Le grand circulus dans lequel la matière est sans cesse engagée apparaît ici avec une admirable clarté.

L'animal périt, le végétal meurt, leurs cadavres deviennent la proie d'une légion d'insectes, puis une armée de bactéries leur succède, pullulant dans cette matière que la vie a abandonnée, le carbone et l'hydrogène s'échappent à l'état d'acide carbonique et d'eau. L'azote qui émigre successivement d'un de ces organismes à l'autre, engagé dans des combinaisons de plus en plus simples, apparaît enfin sous forme d'ammoniaque ; mais ces trois matières, acide carbonique, eau, ammoniaque, qui proviennent des êtres vivants, n'en sont séparées que pour quelques instants, bientôt, elles sont reprises par la plante.

Son rôle dans l'économie générale de l'univers est précisément opposé à celui des microbes; tandis qu'ils brûlent la matière organique et en forment des matières simples saturées d'oxygène : acide carbonique, eau et acide azotique, car ils brûlent également l'ammoniaque, la plante, au contraire, appareil de réduction et de synthèse, reconstitue, à l'aide de ces formes simples, les matières organiques complexes. Par ses feuilles gorgées d'eau, elle saisit l'acide carbonique que le sol

déverse constamment dans l'atmosphère, le réduit sous l'influence des radiations solaires, et forme la matière combustible qui, par des synthèses successives, devient sucre, amidon, cellulose, vasculose, huile, ou encore, quand à l'acide carbonique aérien se joint, dans la cellule, l'ammoniaque du sol, gluten, caséine, albumine, matières propres à l'alimentation animale, qui, oxydés de nouveau dans l'animal lui-même ou après sa mort, recommencent leur éternel voyage d'un être vivant à l'autre. On prétend que Voltaire a résumé les notions vagues que l'on avait de son temps sur la circulation de la matière par la phrase célèbre : « Nous mangeons nos aïeux. »

Il y a quarante ans, tous les agronomes professaient que l'ammoniaque est l'aliment azoté habituel des végétaux. Les sels ammoniacaux provenant de la distillation de la houille ou des liquides excrémentitiels sont, en effet, employés comme engrais; ils ne peuvent être répandus cependant indifféremment sur tous les sols; très efficaces sur les terres fortes, ils sont moins avantageux sur les terres légères, particulièrement sur les terres calcaires. Ces échecs, la facilité avec laquelle l'ammoniaque, introduite ou formée dans le sol, s'y brûle en se transformant en acide azotique, l'efficacité des azotates, ont déterminé, il y a peu d'années, un revirement aussi brusque que complet dans les opinions des physiologistes. On crut que l'ammoniaque ne pénétrait pas en nature dans les tissus végétaux et que son azote n'était utilisé qu'après avoir perdu son hydrogène,

gagné de l'oxygène et une base et être devenu nitrate de chaux ou de potasse, de façon qu'il fallut entreprendre des expériences précises pour montrer qu'une part revient à l'ammoniaque dans la nutrition végétale.

Pour réussir à démontrer que les nitrates ne sont pas les seuls aliments azotés des plantes, mais que l'ammoniaque elle-même est utilisée, M. Muntz sema des plantes d'expériences dans un sol dépouillé de nitrates par des lavages prolongés, et privé, par l'action du feu, des ferments capables de nitrifier l'ammoniaque. Il ne suffisait pas qu'au début les terres fussent incapables de transformer les sels ammoniacaux dont on voulait constater l'efficacité, il fallait, en outre, que cette transformation ne pût avoir lieu au cours de la végétation, car si, à un moment quelconque, l'analyse décelait la présence des nitrates, l'expérience perdait toute valeur. Or, les ferments nitrificateurs sont très répandus; très légers, ils sont entraînés de tous côtés, flottant dans les poussières de l'air. Il fallait donc mettre les terres à l'abri de ces poussières; on logea les cultures dans de grandes cages de verre, dont les parois étaient enduites d'une matière visqueuse, la glycérine, très propre à retenir les poussières atmosphériques. Pour laisser cependant un libre accès à l'air, une des parois fut fermée avec un treillage métallique à mailles serrées, également enduites de glycérine. Du maïs, des fèves, de l'orge, des féveroles, du chanvre, furent élevés dans ces conditions, et, bien que jamais les nitrates n'eussent

été cônstatés dans le sol, ces plantes acquirent un développement normal qu'on ne peut attribuer qu'à l'influence de sels ammoniacaux employés comme engrais.

Un de mes collaborateurs du Muséum, dont le nom est revenu souvent dans ces études : M. Bréal a donné au reste de cette assimilation de l'ammoniaque par les végétaux une démonstration très élégante. On enlève avec une bèche, dans un jardin, une touffe d'un graminée vulgaire telle que le *Poa Annua*, puis on lave ses racines et on les immerge dans un flacon ; après deux ou trois jours, de nouvelles racines bien blanches, repartent du collet; à l'aide de ciseaux on enlève les anciennes racines terrestres, et la plante ayant ainsi changé de système radiculaire est apte à vivre dans l'eau. Quand elle s'est acclimatée à ce nouveau régime, on introduit dans le liquide une très petite quantité de sulfate d'ammoniaque très facile cependant à caractériser à l'aide d'un réactif très employé dans les laboratoires, le réactif de Nessler, qui donne avec les sels ammoniacaux très étendus une coloration jaune et un précipité rouge orangé quand les dissolutions sont plus concentrées ; au moment où le sel ammoniacal est introduit dans le liquide, le réactif indique nettement la présence de l'ammoniaque, mais le lendemain, toute coloration a disparu, l'ammoniaque a été saisie par les racines, assimilée par la plante.

§ V

Formation des nitrates.

C'est cependant, il faut le reconnaître, sous forme de nitrates ou d'azotates, ces deux noms désignent la même classe de sels, que la plupart du temps l'azote pénètre dans les végétaux, et dès lors l'étude de leur formation présente pour la culture un intérêt de premier ordre.

Les salpêtriers utilisent depuis longtemps les nitrates qui apparaissent spontanément sur les murs des lieux habités, des étables, des écuries, dans les caves des maisons mal tenues ; ces nitrates, mélangés au charbon et au soufre, constituent la poudre à canon, et leur recherche dans les maisons fut, au siècle dernier, l'occasion de terribles vexations.

On savait bien du temps de Lavoisier que le nitre ou salpêtre, que nous nommons aujourd'hui azotate de potasse, tire son origine de l'altération des matières d'origine animale, mais on ignorait encore sa composition ; ce ne fut que plus tard, quand les progrès de l'analyse apprirent que les matières animales, l'ammoniaque et l'acide azotique, ont un élément commun : l'azote, qu'on comprit que la nitrification est due à l'oxydation de ces matières animales ou de l'ammoniaque ; quant au mécanisme même de cette oxydation, il resta longtemps ignoré.

Une expérience célèbre d'un chimiste bien connu, Kuhlmann, engagea d'abord les recherches dans une mauvaise voie. Le platine récemment séparé d'une combinaison par l'action d'une température insuffisante pour le foudre se présente sous forme d'une masse grisâtre, faiblement agglutinée, qui est désignée dans les laboratoires sous le nom d'éponge ou de mousse de platine; si on place cette substance, tenue à l'extrémité d'un fil de platine, dans un courant de gaz hydrogène, le gaz se condense dans l'éponge métallique, elle rougit et bientôt l'élévation de température est suffisante pour déterminer l'inflammation de l'hydrogène. La mousse de platine provoque encore l'union de l'acide sulfureux et de l'oxygène en lourdes vapeurs blanches, irritantes, d'acide sulfurique; Kuhlmann découvrit enfin que, si on dirige un courant d'air et d'ammoniaque dans un tube renfermant de la mousse de platine, légèrement chauffée, l'ammoniaque se brûle partiellement et l'on recueille de l'azotate d'ammoniaque.

Cette jolie expérience, très facile à reproduire, fut hardiment généralisée. On crut que, si le salpêtre apparaît sur les murs d'une étable ou d'une écurie, dans le sol d'une cave, c'est que l'ammoniaque y est brûlée par l'oxygène, sous l'influence d'un corps poreux, agissant à la façon de la mousse de platine; ces corps poreux auxquels on attribuait cette action comburante étaient les murs mal crépis, ou la terre elle-même. On vécut sur cette idée jusqu'au

moment où, en 1862, M. Pasteur montra que presque toutes les combustions lentes sont provoquées par des micro-organismes; l'alcool, par exemple, ne se transforme, par oxydation, en acide acétique, en vinaigre, que lorsque la surface du liquide à acétifier est recouverte d'un léger voile d'une moisissure blanche du *mycoderma aceti;* l'oxydation de l'ammoniaque, sa transformation en acide azotique n'est-elle pas provoquée également par l'activité d'un ferment? Dès cette époque, M. Pasteur n'hésitait pas à dire que l'étude de la nitrification était à reprendre; chose curieuse cependant, quand Boussingault, en 1873, écrivit son remarquable mémoire sur l'action qu'exerce la terre arable sur la nitrification, il ne fit aucune allusion à cette nouvelle manière de voir [1].

Suffit-il qu'une matière azotée soit en présence d'un corps poreux et de l'air, comme l'avait enseigné Kuhlmann, pour qu'elle s'oxyde et se transforme en acide azotique? Pour le savoir, Boussingault introduit dans divers corps poreux : sable, craie, terre, des matières azotées essentiellement nitrifiables; il maintient ses mélanges humides et bien aérés pour favoriser la nitrification, puis après quelque temps recherche les nitrates formés. Dans le sable ou la craie, la matière azotée ne subit aucune transformation; dans la terre, au contraire, la métamorphose est rapide; les nitrates

1. Boussingault y avait réfléchi cependant, je me rappelle très bien lui avoir entendu discuter l'influence que pouvaient exercer sur l'oxydation de l'ammoniaque les micro-organismes, qu'il appelait familièrement les *champignons de Pasteur*.

n'ont pas apparu dans les deux premiers corps poreux, ils sont abondants dans le dernier. Que renferme donc la terre qui manque dans le sable ou la craie? Boussingault se borne à exposer les faits sans les interpréter, et il fallut attendre quatre ans avant de savoir pourquoi la terre agit autrement que les autres corps poreux.

MM. Schlœsing et Muntz nous l'ont appris au cours des recherches qu'ils ont entreprises sur l'épuration des eaux d'égout. — Personne n'ignore que la ville de Paris jette dans la Seine, à Clichy, le flot noir de ses eaux d'égout, au grand détriment des populations qui utilisent en aval l'eau du fleuve. Bien des essais furent tentés pour purifier ces eaux, avant que, sous la pression des ingénieurs Mille et Durand Claye, on se résolût à essayer la filtration au travers d'un sol perméable. Il y a plus de vingt-cinq ans qu'on fit passer une petite quantité d'eau d'égout dans la presqu'île de Gennevilliers et qu'on commença les irrigations.

La quantité d'eau qu'une terre peut recevoir journellement sans que l'épuration soit compromise varie naturellement avec la perméabilité du sol. Celui de Gennevilliers est très filtrant; comme de plus la presqu'île n'offre qu'une surface restreinte, que le fleuve noir de Clichy roule un volume d'eau considérable, on fut conduit, pour tâcher d'épurer le plus d'eau possible, à exagérer l'épandage; le plan d'eau du sous-sol se releva, les caves, toutes les parties déclives du terrain furent envahies par des eaux infectes. D'énergiques réclamations, des plaintes, des menaces, se firent

entendre. Il fallut procéder à une étude sérieuse et chercher quelle est la quantité d'eau maxima qui peut être répandue journellement, sans compromettre l'épuration. M. Schlœsing fut chargé des essais et s'adjoignit, pour ses recherches, M. Muntz.

. On remplit de grands cylindres de deux mètres de haut, avec la terre de Gennevilliers, on y déversa régulièrement l'eau d'égout, en réglant l'épandage. Quand l'eau filtre lentement au travers du sol, elle lui abandonne toutes les matières solides qu'elle tient en suspension; l'eau bourbeuse déversée sort à la partie inférieure des cylindres absolument limpide; les matières dissoutes elles-mêmes ont subi une profonde modification. L'eau d'égout renferme des sels ammoniacaux, provenant de la fermentation des liquides excrémentitiels, l'eau filtrée n'en contient plus, mais elle est chargée de nitrates; pendant son passage au travers du sol, l'ammoniaque s'est brûlée, ses deux éléments se sont unis à l'oxygène; l'hydrogène pour donner de l'eau, l'azote : de l'acide azotique. Les observations ainsi recueillies dans l'étude de la purification des eaux d'égout confirment simplement les observations de Boussingault sur l'influence nitrifiante de la terre arable, et il aurait été oiseux de les décrire si elles n'avaient été l'occasion de la découverte capitale qui a illustré les noms de MM. Schlœsing et Muntz.

Quelque temps auparavant, M. Muntz avait fait une observation d'un haut intérêt, il avait reconnu que le chloroforme, dont personne n'ignore les propriétés

anesthésiques, agit sur tous les êtres de la série animale et que notamment il engourdit, endort, paralyse l'activité des ferments figurés. Rien n'est plus curieux que de le constater; quand on examine au microscope une goutte d'un liquide en fermentation butyrique, par exemple, fermentation provoquée par d'innombrables bactéries parcourant rapidement le champ du microscope, s'arrêtant brusquement pour repartir aussitôt, puis qu'on glisse entre les deux lames de la préparation une goutte d'eau chloroformée, on voit, en quelques instants, le repos absolu succéder au mouvement désordonné des bactéries. Tout s'arrête; les microbes, tout à l'heure si agiles, gisent immobiles; ils restent ainsi tant que persiste l'influence du chloroforme. Si on le laisse se dissiper en soulevant légèrement la lame de verre, on reconnaît qu'après quelque temps le mouvement reparaît, lent d'abord, puis de plus en plus rapide. Visiblement les ferments figurés perdent toute activité quand ils sont soumis à l'influence du chloroforme.

Profitant de cette intéressante observation, MM. Schlœsing et Muntz introduisent dans un des cylindres où se déverse l'eau d'égout une capsule renfermant du chloroforme; puis ils examinent jour par jour l'eau qui filtre au travers du sol. Cette eau est toujours limpide, mais bientôt les nitrates diminuent, puis disparaissent... Dans la terre chloroformée, la nitrification cesse de se produire; or, le chloroforme n'agit que sur les êtres vivants. S'il a suffi de le faire pénétrer dans le

sol pour lui faire perdre ses propriétés nitrifiantes, c'est que la nitrification est, comme l'avait pensé M. Pasteur, une véritable fermentation. Il est facile de contrôler cette conclusion par d'autres essais; les micro-organismes périssent quand ils sont soumis à des températures de 100 à 120 degrés; en effet, une terre perd ses propriétés nitrifiantes, aussitôt qu'elle est chauffée, stérilisée, suivant l'expression consacrée, qui indique que tous les êtres vivants ont été tués. — Si, enfin, on réensemence cette terre dépouillée de ses propriétés nitrifiantes par cette température de 120 degrés, avec une terre qui les possède encore, avec quelques parcelles d'une terre non chauffée, les organisnes nitrificateurs pullulent de nouveau, et les nitrates réapparaissent dans les eaux.

Si on se rappelle que la matière azotée du sol est inerte, qu'habituellement elle n'exerce aucune action sensible sur la végétation, si on se rappelle qu'au contraire les nitrates présentent une telle efficacité que les récoltes confiées à un sol stérile croissent en raison du poids de nitrate ajouté, on comprend quel retentissement eut la découverte de MM. Schlœsing et Muntz, et quelles idées nouvelles elle suscita aux agronomes : pour eux désormais, une terre fertile devient un *véritable milieu de culture* des ferments nitriques.

L'existence de ces ferments fut déduite des expériences précédentes et une dizaine d'années s'écoulèrent avant qu'ils eussent été isolés. Leur découverte appartient à un éminent physiologiste russe, M. Winogradsky, elle

a été faite à Zurich. Après de nombreux essais témoignant d'autant de sagacité que de patience, M. Winogradsky réussit à isoler le ferment *nitreux* [1], c'est-à-dire l'être vivant qui amène l'ammoniaque à un degré d'oxydation inférieure. Cinq ou six jours après l'ensemencement d'un liquide ne renfermant par litre d'eau que 1 gramme de sulfate d'ammoniaque, 1 gramme de phosphate de potasse et du carbonate de magnésie, sans aucune matière organique, M. Winogradsky vit apparaître dans l'eau un léger trouble dû à des organismes ovales un peu fusiformes, se mouvant dans le liquide avec une grande activité; cette activité n'est pas de longue durée : après quelque temps, les organismes tombent au fond du liquide et recouvrent le carbonate de magnésie d'une sécrétion glaireuse.

On a remarqué que les micro-organismes qui transforment l'ammoniaque ajoutée au liquide en acide nitreux qu'on retrouve uni à la magnésie, avaient été ensemencés dans un milieu dépourvu de matière organique capable de fournir le carbone nécessaire à leur multiplication. C'est qu'en effet les *nitromonades* possèdent une propriété fort inattendue; ces organismes croissent, se multiplient, augmentent leur masse pondérale en s'emparant du carbone de l'acide carbonique contenu dans le carbonate de magnésie.

C'est là un fait très curieux sur lequel il convient

1. L'azote s'unit à l'oxygène en plusieurs proportions : quand 14 d'azote prennent 40 d'oxygène, la combinaison formée est l'acide azotique ou nitrique ; quand 14 d'azote ne s'unissent qu'à 24 d'oxygène, c'est l'acide azoteux ou nitreux qui s'est formé.

d'insister; il n'est pas besoin de rappeler que l'union du carbone à l'oxygène avec production d'acide carbonique, qui a lieu dans tous nos foyers, est accompagnée d'un puissant dégagement de chaleur; et on conçoit aisément que le phénomène inverse, la décomposition de l'acide carbonique en carbone et oxygène, la séparation en ses éléments de l'acide carbonique, exigera une consommation de chaleur précisément égale à celle qui est dégagée au moment de la combinaison.

Nous assistons journellement à cette réduction de l'acide carbonique. Elle a lieu dans les cellules des plantes vertes, dans les cellules à chlorophylle, comme disent les botanistes, mais elle ne se produit qu'en utilisant une énergie extérieure; c'est seulement lorsqu'elles sont éclairées par les radiations solaires que les feuilles émettent de l'oxygène. Quelques-unes des radiations, dont le mélange constitue la lumière blanche, sont retenues, absorbées par les cellules à chlorophylle et y exécutent ce grand travail de réduction de l'acide carbonique, origine de toute la matière organique qui existe à la surface du globe.

Aussitôt que la lumière fait défaut, les feuilles respirent à la façon des tubercules, des racines, des plantes sans chlorophylle, des animaux, en absorbant de l'oxygène et émettant de l'acide carbonique, consommant, par conséquent, de la matière organique; c'est là le régime de la grande armée des champignons. Ils vivent de matière carbonée déjà formée, ils sont parasites de plantes vivantes ou destructeurs de plantes mortes,

mais ne vivent jamais que sur la matière organique.

Il en est habituellement de même des bactéries qui brûlent de la matière organique par leur respiration en même temps qu'elles s'en approprient quelques éléments. La *nitromonade* vit tout autrement, elle prospère dans un milieu privé de matière organique, elle emprunte son carbone à l'acide carbonique. On conçoit cependant que ce carbone ne sera séparé de l'oxygène qu'à l'aide d'une énergie extérieure, remplaçant, par exemple, celle des radiations solaires agissant dans les cellules à chlorophylle. D'où provient cette énergie? De la chaleur dégagée par la combustion de l'hydrogène de l'ammoniaque; quand, en effet, l'ammoniaque, formée d'azote et d'hydrogène, est brûlée par l'oxygène de l'air, sous l'influence de la nitromonade la combustion de cet hydrogène développe une somme de chaleur considérable. Or toute cette chaleur ne se dissipe pas pendant la nitrification, une partie est utilisée à la réduction de l'acide carbonique, et le carbone provenant de cette réduction sert à la constitution des nouvelles cellules de nitromonade. Telle est la manière de voir qu'a développée l'éminent physiologiste russe.

M. Winogradsky a reconnu, en outre, que la transformation de l'ammoniaque en acide nitrique comporte deux étapes successives. La nitromonade que nous venons de décrire ne donne que de l'acide nitreux, c'est-à-dire la combinaison acide la moins chargée d'oxygène que puisse fournir l'azote.

La transformation de l'azote est complétée par un

autre organisme tout différent de la nitromonade; le ferment qui porte l'oxygène sur l'acide nitreux pour l'amener à l'état d'acide nitrique est formé de petits bâtonnets de forme anguleuse, irrégulière, n'exerçant que sa fonction spéciale de suroxydation, mais tout à fait incapable de provoquer l'oxydation de l'ammoniaque; il y a là une division du travail des plus intéressantes.

Quand on obtient dans un milieu de culture approprié des nitrates, c'est que ce milieu renferme deux microorganismes différents, la nitromonade transformant l'ammoniaque en acide nitreux, les bâtonnets transformant à leur tour l'acide nitreux en acide nitrique.

Dans les sols cultivés, ils sont habituellement réunis, et c'est sous forme de nitrates que l'azote combiné est utilisé par les végétaux. Ainsi que nous l'avons dit déjà à plusieurs reprises dans le cours de cet écrit, les nitrates exercent sur leur croissance une influence tellement décisive que les cultivateurs n'hésitent pas à s'imposer de lourdes dépenses pour se les procurer et que près d'un million de tonnes de nitrates sont introduites chaque année en Europe.

Ces engrais viennent s'ajouter aux nitrates qui se produisent spontanément dans nos sols quand les conditions favorables à la nitrification y sont réalisées.

Étudions donc minutieusement, les unes après les autres, ces conditions; nous serons récompensés de notre effort par la certitude que cette étude va nous donner des notions précises sur la fertilité des terres arables

Ces conditions sont nombreuses, toutes doivent être remplies pour que la nitrification se produise; et, tout d'abord, il faut que le sol renferme la matière azotée à transformer. Or, dans les terres qui ne reçoivent pas d'engrais, cette matière est l'humus dont la résistance à l'action des ferments explique l'abondance dans la plupart des terres; cette résistance est telle que très souvent la quantité de nitrates formée en temps utile n'est capable d'alimenter que de faibles récoltes. Pour qu'elles deviennent plus abondantes, il faut apporter des matières plus attaquables que l'humus, le fumier notamment, dont les sels ammoniacaux se transforment rapidement, tandis que ses matières organiques n'entrent en jeu que plus lentement.

Les transformations de ces matières complexes n'ont lieu, nous l'avons dit, que sous l'influence des ferments nitriques; ceux-ci sont très répandus, MM. Muntz et Aubin ont pu constater leur présence non seulement dans toutes les terres cultivées qu'ils ont examinées, mais encore dans des lieux déserts et même des stations élevées telles que le pic du Midi; en revanche, les ferments nitriques paraissent être cantonnés dans les couches superficielles du sol; à une certaine profondeur, ils deviennent rares, puis, plus bas, disparaissent.

Les ferments nitriques sont des agents d'oxydation; par suite, on conçoit qu'ils ne travaillent qu'autant qu'ils se trouvent dans une atmosphère oxygénée. Cette condition est bien loin d'être toujours remplie; si l'air circule aisément dans une terre ameublie par les

instruments, assainie par un sous-sol perméable, par des fossés d'écoulement ou par le drainage, il n'en est plus de même dans une terre plate, à sous-sol imperméable, non drainée. Un sol semblable se gorge d'eau pendant l'hiver, l'air n'y circule pas, la nitrification s'arrête. — Dans les terres fortes, argileuses, elle est parfois difficile à cause de leur compacité, elle est plus facile dans les terres légères et humides; cet avantage des terres sablonneuses est compensé par leur facile dessiccation; or, l'humidité n'est pas moins nécessaire à l'évolution des ferments que l'air lui-même; dans une terre sèche, tout s'arrête, l'ammoniaque introduite persiste.

A ces conditions : présence des ferments, d'une matière nitrifiable, de l'air et de l'eau, s'en ajoutent d'autres encore. La nitrification ne se produit qu'entre des limites de températures comprises entre 10° et 45° ; quand, en hiver, le froid sévit, les ferments nitriques ne fonctionnent pas, ils ne travaillent pas davantage dans les terres brûlées par les radiations solaires; enfin, la production des nitrates n'est abondante que dans les terres où il existe du calcaire. Il arrive très souvent qu'un ferment vit mal dans un milieu renfermant en quantité sensible les produits qu'il a formés; l'activité des ferments alcooliques s'atténue dans un liquide chargé d'alcool; les ferments qui transforment le sucre en acide lactique on en acide butyrique cessent de travailler si le liquide, dans lequel ils ont été ensemencés, ne renferme pas de

carbonate de chaux destiné à saturer les acides produits à mesure de leur formation. Il en est de même du ferment nitrique, il n'entre pas en jeu dans un milieu où les acides produits ne sont pas saturés par le calcaire. De là, la grande utilité des apports de chaux ou de marne dans les terrains granitiques.

La nitrification est languissante cependant, aussitôt après l'apport de la chaux caustique ; le milieu est trop alcalin pour que les ferments nitriques y prospèrent ; mais très rapidement la chaux s'unit à l'acide carbonique aérien, la causticité disparaît, les nitrates se forment régulièrement, et le sol devient fertile.

Quand toutes ces conditions sont réalisées, la végétation des espèces végétales qui bénéficient davantage des nitrates est prodigieuse. Un des plus beaux exemples connus est fourni par les *marcites* de Milan, constamment arrosées par de l'eau mélangée d'eau d'égout. Elles fournissent annuellement six ou sept coupes d'herbe ; ces terres sont louées 500 francs l'hectare.

§ VI

La nitrification dans la terre arable. — Étude des eaux de drainage.

La formation des nitrates est, nous l'avons dit plusieurs fois, la condition même de la fertilité. Il est, par suite, du plus haut intérêt de la suivre attentivement, non

seulement dans les expériences de laboratoire, mais aussi sur des sols en place, nus et cultivés. — Or, cette étude est facilitée par une propriété très fâcheuse que possèdent les nitrates; contrairement à ce qui arrive pour d'autres éléments de fertilité tels que l'acide phosphorique, la potasse ou l'ammoniaque, ils ne sont pas retenus par la terre; si on fait filtrer une dissolution de nitrate au travers d'un sol, on trouve que la dissolution est aussi chargée après son passage qu'elle l'était avant, tandis que, si on avait fait filtrer au travers du sol une eau chargée d'ammoniaque, de potasse ou d'acide phosphorique, on ne trouverait en général dans l'eau d'égouttage qu'une minime fraction des éléments dissous introduits.

C'est ce qu'il est facile de vérifier en étudiant les eaux de drainage. — On sait que lorsqu'une terre repose sur un sous-sol imperméable, il est de toute nécessité de provoquer artificiellement le départ des eaux quand celles-ci ne trouvent pas, dans la disposition inclinée du sol, un écoulement naturel; on procède alors au drainage en creusant dans le champ reposant sur cette couche imperméable une série de fossés, au fond desquels on dispose des tuyaux en terre poreuse fixés, bout à bout, à la suite les uns des autres; on recouvre les drains avec la terre, l'eau s'infiltre dans les tuyaux poreux et s'écoule dans un ruisseau. Ces eaux, très habituellement chargées de nitrate de chaux, ne renferment ni ammoniaque, ni acide phosphorique; on n'y trouve de potasse, à l'état de nitrate, que lorsque le calcaire fait défaut.

Sirs J.-B. Lawes et H. Gilbert ont donné un grand nombre d'analyses des eaux provenant du drainage du champ sur lequel ils ont établi la culture continue du blé. J'ai moi-même consacré plusieurs années à l'étude des eaux de drainage soit de terres maintenues sans végétation, soit plus récemment de terres portant des plantes variées. A l'imitation de ce qu'avait fait déjà M. Berthelot, j'ai adopté pour l'étude du drainage des terres nues une méthode qui permet de varier beaucoup les expériences. J'ai fait construire de grands vases en terre vernissée à l'intérieur; ces vases sont soutenus par un trépied en fer, au-dessus de flacons dans lesquels s'écoule, par un orifice muni d'un bouchon et d'un tube de verre, l'eau qui a traversé le sol ; on place au fond des vases un lit de cailloux pour assurer l'écoulement, puis au-dessus la terre que l'on veut mettre en expériences. Les vases en renferment 60 kilos environ ; ils se prêtent très bien, ainsi qu'il vient d'être dit, à l'étude des eaux de drainage provenant des terres sans végétation ; mais quand il s'agit des terres cultivées, ils ne donnent plus que des indications incertaines. Nos plantes de grande culture vivent mal dans un cube de terre restreint où leurs racines ne s'étalent pas à l'aise. Le blé, l'avoine, les betteraves, le maïs, le chanvre, sont restés chétifs quand j'ai voulu les semer dans ces vases de faibles dimensions et j'ai dû opérer autrement.

J'ai fait construire au champ d'expériences de Grignon de grandes cases carrées, en ciment imperméable; elles ont 2 mètres de côté et 1 mètre de hauteur, elles

présentent donc une capacité de 4 mètres cubes et renferment 5 tonnes de terre; les récoltes y sont habituellement bonnes, analogues à celles qu'on obtient en pleine terre. Le fond de ces caisses est incliné d'arrière en avant, creusé en forme de rigole; à la partie la plus déclive on a ajusté un tuyau de plomb qui envoie les eaux dans de grandes bonbonnes où elles sont recueillies, mesurées et analysées.

Toute l'eau tombée sur une terre nue ne la traverse pas pour arriver jusqu'aux drains : si pendant l'hiver presque toute la pluie est évacuée par les drains, pendant le printemps une partie seulement de l'eau est recueillie ; une fraction importante est évaporée; cette fraction devient considérable pendant l'été, la terre est échauffée par les radiations solaires et l'évaporation enlève presque la totalité de l'eau tombée. Il n'en est plus ainsi à l'automne; à mesure que la température baisse, l'évaporation s'amoindrit et l'eau recueillie augmente.

Quand on analyse l'eau de drainage des terres nues aux diverses époques de l'année pour déterminer les nitrates qu'elle entraîne, on n'en trouve qu'une faible quantité en hiver, la proportion augmente pendant le printemps, devient notable en été et à l'automne. — En multipliant le poids d'azote nitrique contenu dans chaque litre d'eau écoulée, par le nombre de litres recueillis, on obtient la quantité d'azote nitrique produite aux différentes époques. Si, enfin, on prend la moyenne des nombres obtenus par l'étude des eaux de drainage de terres très différentes les unes des autres,

pendant les années 1890, 1891 et 1892, puisqu'on les rapporte à la surface sur laquelle portent toutes les comparaisons agricoles, à l'hectare de 10 000 mètres carrés, on arrive aux nombres suivants, singulièrement instructifs :

Azote nitrique produit par hectare:

Printemps............	17 kil. 8
Été..................	26 kil. 4
Automne.............	40 kil. 6
Hiver................	11 kil. 8

Nous avons déjà indiqué qu'une bonne récolte moyenne exige environ 100 à 120 kilos d'azote combiné. Or cet azote doit être à la disposition de la plante pendant le printemps et le commencement de l'été; dès la fin de juin, le blé ou l'avoine n'assimilent plus; la betterave, il est vrai, absorbe les nitrates formés plus tardivement, mais sans grande utilité ils s'emmagasinent dans la racine où ils sont singulièrement gênants, nuisant à la santé des animaux qui consomment ces betteraves ou entravant l'extraction du sucre. — En réalité, les nitrates du printemps et ceux du commencement de l'été sont les seuls utiles; ceux qui se forment pendant la fin de l'été, l'automne et l'hiver sont habituellement entraînés par les eaux de drainage, jetés aux rivières, à la mer, perdus.

Les chiffres précédents montrent que la nitrification au printemps est absolument insuffisante. Il est facile d'en comprendre la raison : à cette époque la terre est habituellement assez humide, mais la température est

trop basse pour que les ferments entrent vigoureusement en jeu; ils sont affaiblis pendant l'hiver, et ne sortent que lentement de leur engourdissement. Tandis que certains ferments du sol, les ferments butyriques, par exemple, évoluent en 24 ou 30 heures, l'incubation des ferments nitriques est singulièrement plus lente; une terre prise dans un champ pendant l'hiver, placée dans les conditions les plus favorables de température, d'humidité, d'aération, reste plusieurs semaines sans élaborer une quantité notable de nitrates. C'est précisément pour compenser cette insuffisance de la nitrification de l'humus, la lenteur d'action des ferments nitriques, que nous enfouissons dans le sol des engrais azotés, du fumier dont les sels ammoniacaux se transforment aisément, et surtout du nitrate de soude. C'est parce que la nitrification du printemps est insuffisante, qu'une flotte entière est sans cesse occupée à introduire en Europe le nitrate de soude qu'elle va péniblement chercher sur la côte du Pacifique; c'est à cause de cette insuffisance que l'Europe importe, ainsi que nous l'avons dit déjà, des quantités croissantes de nitrate de soude; en 1894, elle en a reçu 974 000 tonnes représentant une valeur de 205 millions de francs [1], presque entièrement payée par la culture.

Visiblement, les cultivateurs ne consentent à débourser une si forte somme que parce qu'ils ont reconnu

1. Nous prenons ce chiffre dans des articles très intéressants de M. Maizières publiés par le journal l'*Engrais*, numéro du 29 mars 1895.

que cet engrais était absolument efficace, et qu'ils n'obtenaient de pleines récoltes qu'à la condition d'ajouter aux faibles quantités d'azote nitrique qui se forment dans leur sol, 200, 300 kilos de nitrate de soude.

Ainsi, malgré l'abondance de l'humus que renferment tous nos sols cultivés, bien que la proportion d'azote qu'ils contiennent soit souvent cent fois supérieure aux besoins des récoltes, l'inertie de cet humus est telle, la résistance qu'il oppose aux ferments si énergique, qu'il nous faut faire des dépenses considérables d'azote combiné, qu'il nous faut importer à grands frais du nitrate de soude; cette importation est nécessaire, parce que nous ne savons pas déterminer dans nos terres, au printemps, une abondante formation de nitrates.

Cette résistance de l'humus est-elle invincible? N'existe-t-il aucun moyen de surexciter l'action des ferments? M. Schlœsing, il y a déjà plusieurs années, a remarqué que, si on triture une terre, dans laquelle la nitrification est faible, on l'active; il en donne pour raison que les ferments ne se déplacent pas dans le sol comme dans un liquide, qu'ils restent fixés dans la très mince couche d'eau qui adhère à chaque molécule de terre. C'est dans ce domaine très restreint qu'ils opèrent, épuisant leur action sur les matières voisines, puis cessant leur travail quand ces matières ont été transformées, pour ne le reprendre que si d'autres substances viennent remplacer celles qui ont disparu

sous leur action même. J'ai d'abord accepté cette manière de voir, toutefois, il me paraît maintenant que la trituration du sol, qui entraîne sa pulvérisation, a une autre utilité : elle favorise l'aération.

Quand on détermine la quantité d'air contenu dans une motte de terre, on la trouve d'autant plus faible que la terre est plus humide, or la nitrification étant essentiellement une oxydation, un sol composé de grosses mottes peu ou pas aérées, ne produit pas de nitrates comme il le ferait, si toutes les mottes, maintenues humides, étaient brisées, pulvérisées, car l'air peut alors baigner toutes les particules de terre.

Quand toutes les conditions favorables à la nitrification sont réunies, cette trituration, cette aération du sol donnent une prodigieuse énergie au phénomène; il apparaît dans les terres bien pulvérises des quantités de nitrate formidables, bien supérieures à celles qui sont nécessaires aux récoltes les plus abondantes. La réunion de ces circonstances favorables se rencontre parfois fortuitement. On reçoit dans un laboratoire de chimie agricole un envoi de terre, on le met en expériences; il fournit des nitrates en telle abondance qu'on croit au premier abord que la terre a été additionnée de nitrates, et qu'il faut s'assurer que l'acide azotique est bien combiné à la chaux et non à la soude, pour comprendre que cette production exubérante est due à ce que la terre, au moment de son prélèvement, pendant le voyage et sa mise en expériences, a été remuée, pulvérisée, tout en restant humide. Il est facile au reste de déterminer, au

laboratoire, dans une terre, une formation de nitrate excessive, en la triturant avec beaucoup de soins et la maintenant humide; si elle est sèche, la trituration ne produit aucun effet.

J'ai eu une preuve décisive de l'influence qu'exerce sur la nitrification une aération prolongée, par la composition des eaux de drainage écoulées des cases de végétation pendant l'année 1892. Pour les construire, il a fallu naturellement commencer par enlever la terre, aux endroits où la construction devait avoir lieu. Cette terre est restée amoncelée, exposée à l'air pendant deux mois, puis elle servit à remplir les cases au mois d'octobre 1891. Mes observations des eaux de drainage commencèrent au mois de mars 1892. Or, pendant l'année mars 1892-mars 1893, une case restée sans engrais donna 221 kilos d'azote nitrique. Pendant l'année suivante mars 1893-mars 1894, cette même case restée encore sans travail et sans engrais ne fournit plus que 79^{k},2 d'azote nitrique et pendant la troisième année 71^{k},19.

Ces notions récemment acquises éclairent singulièrement les pratiques agricoles. Que font les hommes qui travaillent la terre? Pourquoi ont-ils, depuis l'antiquité la plus reculée, attelé à un pieu durci au feu un bœuf, un cheval, un âne, et ont-ils chaque année, souvent plusieurs fois dans la même année, ouvert le sol? Pourquoi, à mesure des progrès de la civilisation, ont-ils apporté tous leurs soins à construire des charrues de plus en plus puissantes? Pourquoi à ce travail de la

charrue ajoutent-ils aujourd'hui celui d'une herse à dents pointues et recourbées, qui, promenée sur les grosses mottes de terre qu'a laissées la charrue, les brise, les triture et les réduit en poudre?

Depuis des siècles, ce travail de la terre est l'occupation principale des cultivateurs; c'est le travail par excellence, le *labor*, et l'homme qui s'y livre, le travailleur, s'appelle encore *laboureur*. Que fait ce laboureur? Deux choses : il ouvre son sol et le rend propre à emmagasiner de l'eau, à la retenir, sans la laisser couler comme elle le ferait sur un sol durci, pour que la terre saturée d'humidité puisse fournir à la plante, au printemps, l'eau qui lui est nécessaire; en outre, il aère son sol, il y fait pénétrer l'oxygène, nécessaire à l'activité du ferment nitrique.

On trouve souvent cent fois plus de nitrates dans un échantillon de terre remuée que dans un autre échantillon de même nature, maintenu dans les mêmes conditions d'humidité et de température, mais laissé en repos. Et ce n'est pas sans un amer retour sur la lenteur de la marche de l'esprit humain, qu'on songe qu'il a fallu attendre jusqu'à la fin du XIXe siècle que M. Pasteur ait dévoilé le rôle immense des micro-organismes, que MM. Boussingault et Georges Ville eussent découvert le rôle prépondérant des nitrates dans l'alimentation végétale, que MM. Schlœsing et Muntz aient établi que la nitrification est une fermentation, pour qu'on comprenne enfin la raison du travail auquel les hommes se livrent depuis la plus haute antiquité.

Visiblement, tels que nous les exécutons aujourd'hui, ces travaux sont insuffisants ; si nous sommes contraints, afin d'avoir d'abondantes récoltes, d'acheter du nitrate de soude, c'est à coup sûr parce que nous ne provoquons au printemps dans nos terres qu'une nitrification trop faible. La charrue, en effet, découpe le sol en tranches qui sont retournées, la bande tout entière est déplacée d'un bloc, chacune de ses parties fait une demi-révolution dans un même plan, et toutes ces molécules déplacées restent par rapport les unes aux autres dans la position qu'elles occupaient avant ce déplacement ; ce premier travail, excellent pour ouvrir le sol aux eaux de la pluie qui doivent s'y emmagasiner, ne mélange pas les unes aux autres les diverses parties du sol ; en outre, ces bandes de terre compactes ne sont pas facilement pénétrées par l'oxygène atmosphérique, l'aération est insuffisante.

La herse, ce cadre de bois ou de fer armé de dents, fait un peu mieux. Elle brise les mottes formées par la charrue, de façon que l'air enveloppe les particules de terre ; son travail est efficace, aussi ne se borne-t-on pas à herser les terres nues, les cultivateurs hardis font passer cet instrument dans les champs de blé, au mois d'avril, quand la jeune plante bien enracinée est capable de résister au dur travail qu'elle va subir. — Le proverbe dit : « Si tu herses ton blé, ne regarde pas derrière toi. » C'est qu'en effet l'aspect est lamentable, les tiges sont brisées, piétinées par les attelages ; à la place des lignes vertes, agréables

à l'œil, que présente le champ qu'on attaque, on ne voit plus qu'un désordre qui semble irrémédiable: quinze jours plus tard, tout est réparé, les tiges couchées sont remplacées par de nouvelles pousses, le blé a tallé. C'est l'effet visible, mais certainement aussi ce travail de trituration a peut-être pour effet de disséminer les ferments, de les répandre, de les mettre au contact de matières nitrifiables encore intactes, sur lesquelles ils peuvent exercer leur action, et surtout de briser les mottes de terre, de les réduire en fines particules que l'air peut baigner de toutes parts.

Les constructeurs ont, au reste, imaginé des appareils d'un travail plus efficace que ceux que nous employons d'ordinaire. Je ne serais pas étonné notamment qu'un instrument à dents nombreuses disposées en chicane les unes par rapport aax autres, sur plusieurs rangées successives, variante du scarificateur, méritât d'être plus répandu qu'il ne l'est encore.

Les constructeurs américains, canadiens, anglais, français, rivalisent d'ingéniosité, dans l'invention d'instruments destinés à pulvériser le sol, à l'aérer, et s'ils sont bien convaincus qu'une terre n'est bien préparée qu'autant qu'elle est réduite en poudre fine, il n'est pas douteux qu'ils ne trouvent des appareils encore plus efficaces que ceux que nous employons aujourd'hui. Lorsqu'on sera convaincu qu'en opérant autrement qu'on ne le fait actuellement on peut sinon éviter, au moins beaucoup restreindre, les très lourdes dépenses qu'entraîne l'acquisition du nitrate de soude, on réussira, sans doute,

à construire des appareils propres à remuer le sol, à le mélanger et à y provoquer une nitrification de printemps assez active pour que l'emploi des engrais azotés autres que le fumier de ferme devienne inutile.

Pour réussir, toutefois, une dernière condition doit être remplie : notre sol est bien trituré, il est réduit en poudre, l'air le baigne de toutes parts; sommes-nous certains d'avoir une nitrification active? Hélas, non! Pour qu'elle se produise, il faut que le sol soit humide; si, sur notre terre bien préparée, tombe une pluie opportune, les nitrates apparaissent et nos récoltes sont vigoureuses; si la pluie fait défaut, notre travail devient inutile, l'activité des ferments s'éteint.

C'est seulement dans les sols régulièrement arrosés que le travail du sol acquiert toute sa valeur et la culture maraîchère nous apprend ce qu'il produit. Les maraîchers ne s'établissent que là où l'eau est assez abondante pour que les arrosages soient aisés; ils prodiguent le fumier et comme ils n'épargnent pas leur peine, que sans cesse ils bêchent leur terre, ils obtiennent sur le même sol trois ou quatre récoltes par saison.

§ VII

Nitrification active de l'arrière-saison. — Cultures dérobées d'automne.

Il ne suffit pas de provoquer la nitrification au moment où elle est utile, il faut encore, sinon la res-

treindre à l'automne, au moment où la plupart des récoltes sont abattues, au moins empêcher les nitrates de disparaître. En moyenne, pendant les automnes des quatre dernières années, les pertes dues aux entraînements par les eaux de drainage ont été, à Grignon, pour un hectare de terre nue, de 40 kil. 6 d'azote nitrique, ce qui correspond à 250 kilos de nitrate de soude, c'est-à-dire à une dépense comprise entre 60 et 70 francs par an qui représente le loyer d'un grand nombre de terres passables de notre pays.

Ces pertes sont dues exclusivement à l'écoulement des eaux qui traversent le sol, quand il est nu, dépouillé de ses récoltes. Elles varient naturellement avec l'abondance des récoltes précédentes et la répartition de la pluie; quand les pluies sont très abondantes à l'arrière-saison comme en 1892, les pertes par les eaux de drainage sont très fortes; elles l'ont été également en 1893, et cela, non seulement par l'abondance des pluies d'automne, mais aussi par la faiblesse des récoltes, tandis qu'en 1894, année d'abondance suivie d'un automne sec, elles ont été nulles sur les terres emblavées, mais encore notables pour les terres nues. Or, la terre reste découverte durant toute l'arrière-saison dans notre région septentrionale, notamment dans la partie la plus riche et la plus prospère, celle du Nord-Est, où domine la culture de la betterave, qui revient tous les deux ans, alternant avec le blé. L'année où le sol porte des betteraves, les pertes sont minimes, la plante est arrachée tardivement, et son feuillage abondant couvre encore

le sol pendant la plus grande partie du mois d'octobre, évaporant l'eau tombée, empêchant les drains de couler ; pendant l'automne de 1892, tandis qu'on recueillait la valeur de 6 millimètres d'eau de drainage échappée à une culture de betteraves, une terre qui avait porté du blé en laissait couler 35 millimètres. En moyenne, l'hectare de betterave n'a perdu que 6 kil. 6 d'azote nitrique, l'hectare de blé 54 kil. 6.

Pour éviter ces pertes, il faut empêcher l'écoulement de l'eau de la pluie par les drains ; rien n'est plus aisé : les végétaux sont de puissants appareils d'évaporation, aussi ne voit-on l'eau traverser le sol qu'après la récolte ; tant que la terre est couverte, toute l'eau tombée est rejetée dans l'atmosphère par la transpiration végétale. Il ne faut donc pas qu'à l'automne la terre reste découverte, et aussitôt que la moisson est faite, il faut remplacer la récolte abattue par une culture *dérobée*. Presque toujours, immédiatement après la moisson, on fait passer sur les chaumes de blé ou d'avoine une charrue légère, un scarificateur qui entr'ouvre le sol ; c'est là ce qu'on appelle donner un labour de déchaumage ; cette opération est très utile. Par ce labour on déracine les mauvaises herbes, on permet à la pluie de pénétrer le sol et de l'ameublir assez complètement pour que les labours profonds deviennent possibles ; mais si, entre ce labour de déchaumage d'août et les grands travaux de fin octobre, la terre reste nue, les pluies, habituellement abondantes en septembre, s'infiltrent dans le sol et lui enlèvent les

nitrates formés pendant l'été et non utilisés. Presque toujours les eaux de drainage sont très chargées à l'automne, et on en conçoit facilement la raison. Si la pluie a été fréquente pendant l'été, les deux conditions favorables à la nitrification : humidité, élévation de température, se sont réunies, mais comme, en général, la plus grande partie de l'eau tombée pendant l'été a été évaporée, l'écoulement ne se produit qu'au moment où arrivent les abondantes précipitations d'arrière-saison. Si, au contraire, la pluie est rare pendant l'été, la terre reste chaude jusqu'à l'automne, et c'est seulement à ce moment-là que les nitrates se produisent. Ils apparaissent aussitôt que la pluie amène le sol à l'état convenable au travail des ferments, et comme la terre est nue, qu'elle ne porte aucune plante capable d'évaporer l'eau tombée et de s'emparer des nitrates formés, ils sont entraînés et perdus.

Ces pertes, considérables, nous le répétons, des nitrates pendant l'automne, sont réduites ou même radicalement supprimées par les cultures dérobées. Au mois d'août 1891, on a semé au champ d'expériences de Grignon, soit une légumineuse : de la vesce, soit une autre plante à développement rapide : de la moutarde ; après quelques jours, les champs étaient verts, et tandis que les drains placés au-dessous des terres nues coulaient à plein tuyau, ceux qui assainissaient les terres ensemencées restaient secs. En 1892, les pluies ont été trop abondantes pour que l'évaporation des cultures dérobées pût rejeter toute l'eau tombée ; mais cependant les

eaux recueillies au-dessous des cultures de vesce n'ont pas entraîné au delà du tiers ou du quart des nitrates perdus par les terres nues[1].

Que deviennent les nitrates qui se forment aussi bien dans les terres couvertes de cultures dérobées que dans les terres nues, mais qu'on ne retrouve pas dans les eaux de drainage des terres emblavées? Il importe de le savoir. Si ces nitrates restent en nature dans le sol, ils seront entraînés pendant l'hiver, la perte seulement retardée, et le bénéfice des cultures dérobées singulièrement réduit. L'analyse des eaux de drainage d'hiver montre très bien qu'il n'en est pas ainsi; les nitrates d'automne ont été saisis par les jeunes plantes. Ils sont transformés en matières azotées, leur azote est pendant tout l'hiver soustrait à toutes les causes de déperdition.

Je pratique ces cultures dérobées à l'École de Grignon depuis plusieurs années; je sème au commencement d'août de la vesce, qui est retournée en novembre; en moyenne, le poids de la vesce enfouie est de 15 000 kilos par hectare; sa teneur en azote est à peu près la même que celle du fumier; l'engrais vert représente donc une demi-fumure.

Si la pratique des cultures dérobées devenait générale en France, on en obtiendrait des résultats très avantageux. Nous semons du blé sur 7 millions d'hectares; si, après la moisson, chacun de ces hectares por-

1. Perte d'un hectare de terre restée nue après blé, 54 kil. 6 d'azote nitrique.
Perte d'un hectare de terre ensemencée en vesce, 17 kilos.
Perte d'un autre hectare de terre ensemencée en vesce, 13 kilos.

tait une culture dérobée de vesce, elle fournirait la valeur de 105 millions de tonnes de fumier, et quand bien même la culture dérobée n'équivaudrait qu'à 10 tonnes de fumier, elle représenterait encore 70 millions de tonnes de fumier; or, la statistique de 1882 estime la production annuelle du fumier à 100 millions de tonnes environ; il dépend donc uniquement des cultivateurs de doubler la somme de matières fertilisantes dont ils disposent chaque année.

Quand, dans un laboratoire, on soumet une terre qui dégage de notables quantités d'acide carbonique, dues à la respiration des êtres qui y pullulent, à une température de 120° pendant plusieurs heures, tout dégagement d'acide carbonique cesse; on dit que cette terre est stérilisée, et l'expression dépasse la portée qu'on lui donne habituellement; cette terre est bien, en effet, devenue stérile : toutes les réactions qui assuraient sa fécondité ont disparu, son activité est éteinte, elle est devenue incapable de fixer l'azote atmosphérique, de transformer son humus en ammoniaque, son ammoniaque en acide azotique : ses ferments sont tués. Ce n'est plus qu'une masse inerte dans laquelle la végétation devient aussi languissante que dans du sable calciné; cet arrêt dans toutes les fonctions qui déterminent sa fertilité, aussitôt qu'elle est soumise à l'action du feu, justifie pleinement la belle expression de M. Berthelot : « La terre est quelque chose de vivant. »

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE
LES ENGRAIS

CHAPITRE PREMIER
LES ENGRAIS ORGANIQUES

CHAPITRE II
AMENDEMENTS ET ENGRAIS MINÉRAUX

DEUXIÈME PARTIE

LES FERMENTS DE LA TERRE

CHAPITRE PREMIER

LA FIXATION DE L'AZOTE DANS LE SOL

Pages.

CHAPITRE II

UTILISATION DE L'AZOTE DU SOL

